

Diplomová práce

Kování náprav pro kolejová vozidla

Forging axles for rail vehicles

Jméno autora: Bc. Ondřej Kratochvíl

Rok odevzdání: 2021

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce panu doc. Ing. Miroslavovi Gregerovi, CSc. za odborné konzultace, cenné rady a vedení při zpracování této práce. Zároveň bych také chtěl poděkovat panu Ing. Petrovi Matuškoví CSc. za odborný dohled a pomoc při vypracování experimentů. Dále bych rád touto cestou poděkoval společnosti Bonatrans Group a.s., díky které jsem mohl experimenty realizovat, včetně zveřejnění získaných výsledků.

V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině a blízkým za podporu během mého studia.

ABSTRAKT

Kratochvíl, O. *Kování náprav pro kolejová vozidla*. Ostrava: katedra tváření materiálu, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2021. 52 s.

Diplomová práce, vedoucí: doc. Ing. Miroslav Greger, CSc.

Tato diplomová práce je zaměřena na technologii výroby surových náprav se snahou dosažení co nejlepších výsledků z pohledu struktury a mechanických vlastností. Prozkoumává aspekty směřující ke zlepšení výsledné kvality při výrobě železničních náprav ve firmě GHH-Bonatrans a.s. Úvodem této práce je stručný popis a historie firmy. Práce studuje veškeré operace, které mají přímý nebo nepřímý vliv na jakost výrobku. Práce se zaměřuje především na výsledné mechanické a strukturní vlastnosti výrobků. Tyto vlastnosti jsou vylepšovány optimalizací tepelného zpracování a úpravou chemického složení.

Klíčová slova: železniční náprava, kování, tepelné zpracování, mechanické vlastnosti, struktura.

ABSTRACT

Kratochvíl, O. *Forging axles for railway vehicles*, Ostrava: Department of Material Forming, VŠB – Technical University of Ostrava, 2021. 52 s.

Diploma thesis, head: doc. Ing. Miroslav Greger, CSc.

This diploma thesis is focused on the technology of production of raw axles with an effort to achieve the best possible results in terms of structure and mechanical properties. It examines aspects aimed at improving the resulting quality in the production of railway axles in the company GHH-Bonatrans a.s. The introduction of this work is a description and history of the company. The work studies all operations that have a direct or indirect effect on the quality of the product. The work focuses mainly on the resulting mechanical and structural properties of products. These properties are improved by optimizing the heat treatment and adjusting the chemical composition.

Keywords: railway axle, forging, heat treatment, mechanical properties, structure.

Obsah

1. ÚVOD	6
2. TEORETICKÁ ČÁST	7
2.1. Historie výroby železničních dvojkolí v Bohumíně	7
2.2. Charakteristika železničních náprav	7
2.3. Materiály pro výrobu železničních náprav	9
2.3.1. Výkovek jakosti EA1N	10
2.3.2. Výkovek jakosti EA4T	12
2.3.3. Výkovky pro americký trh	13
3. VÝROBA ŽELEZNIČNÍCH NÁPRAV U NÁS A VE SVĚTĚ	13
3.1. Hornotlaký lis společnosti ŽĐAS	13
3.2. Radiální rychlo kovací lis Vítkovice Heavy Machinery	14
3.3. Taiyuan Heavy Industry Railway Transit Equipment Co Ltd.	14
3.4. Numerická analýza výroby železničních náprav kosým válcováním	15
4. VÝROBA ŽELEZNIČNÍCH NÁPRAV V GHH – BONATRANS GROUP A.S.	16
4.1. Příprava vstupního materiálu	16
4.2. Ohřev materiálu	17
4.3. Kování náprav	18
4.4. Pálení konců náprav, značení.....	19
4.5. Tepelné zpracování železničních náprav.....	20
5. STRUKTURNÍ ZMĚNY PŘI KOVÁNÍ	24
5.1. Stupeň prokování	26
5.2. Mikrostruktura s Widmannstättenovy jehlicemi	27
6. CÍLE PRÁCE	28
7. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	29
7.1. Analýza mechanických vlastností a rozboru struktury předvalku pro nápravy.....	29
7.1.1. Rozbor vlastností vstupního materiálu.....	29
7.1.2. Rozbor struktury vykované nápravy bez tepelného zpracování.....	31
7.1.3. Rozbor struktury po standardním tepelném zpracování	33
7.2. Optimalizace tepelného režimu pro získání lepších mech. Vlastností	35
7.2.1. Rozbor mechanických vlastností po optimalizaci tepelného režimu.	35
7.2.2. Tavení se zvýšeným procentem niklu	37
7.2.3. Rozbor struktury náprav se zvýšeným procentem niklu.....	38
8. DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	44
8.1. Porovnání blok s nápravou bez tepelného zpracování.....	44
8.2. Tepelné zpracování železničních náprav.....	45

8.3. Porovnání 1. tepelného zpracování s 2. tepelným zpracováním	46
8.4. Porovnání 2. tepelného zpracování s tavbou se zvýšeným obsahem niklu.....	46
8.5. Porovnání vlastností A1N s A1T	47
9. ZÁVĚR.....	50
Literatura.....	52

1. ÚVOD

Železniční doprava se řadí mezi vysoce efektivní transportní možnosti, zejména díky velmi rozšířenému spektru přepravy, ať se jedná o přepravu osob nebo nákladní dopravu. Aktuálně jsou již vyvinutá kolejová vozidla, která dosahují vysokých rychlostí. Vysokorychlostní vlak s názvem Fuxing Hao v roce 2016 překonal světový rekord v rychlosti komerčních vlaků, kdy mu byla naměřena mezi Pekingem a Šanghajem maximální krátkodobá rychlost 400 km/h a průměrná rychlost na celé trati 350 km/h. Tento vlak je schopen přepravit až 1280 cestujících a nejčastěji jej můžeme spatřit mezi městy Peking, Šanghaj, Tchien-ťin nebo Kanton. Aktuálně Čína provozuje 978 těchto vysokorychlostních souprav [1].

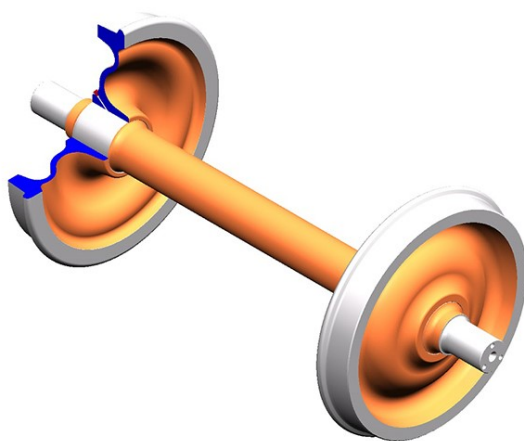
Železniční dvojkolí nese název podle komponent, z kterých se skládá. Skládá se z železničního kola, případně složeného kola a železniční nápravy. Železniční dvojkolí jsou v České republice vyráběna v Bohumíně ve společnosti GHH – Bonatrans Group a.s. Společnost se v roce 2020 zúčastnila prestižní soutěže Zaměstnavatel roku do 5000 zaměstnanců, kde se firmy hodnotí podle úrovně řízení lidských zdrojů, dosažení ekonomických výsledků, pracovního prostředí, společenské odpovědnosti firmy nebo míru dobrovolné fluktuace. V této soutěži společnost získala 2. místo. Výrobky společnosti GHH – Bonatrans Group jsou expedovány do celého světa a patří mezi špičkové výrobky i v porovnání se světovou konkurencí.

V mé diplomové práci se zabývám zdokonalením mechanických a mikrostrukturních vlastností železničních náprav. Pozoruji mikrostrukturu a mechanické vlastnosti při celém materiálovém toku výroby náprav. Navrhuji inovaci v tepelném zpracování, kdy je na stejném výrobku provedeno vícenásobné tepelné zpracování. Dále navrhuji úpravu chemického složení výrobku, která je stále v souladu s evropskou normou, s předpokladem, že se zvýšením hmotnostního procenta, konkrétně niklu, přinese požadované vlastnosti. Postup zkoušení probíhá na vstupním materiálu, dále postupně na surové nápravě bez tepelného zpracování, tepelně zpracované nápravy, násobně tepelně zpracované nápravy a zkoušení tavby se zvýšeným obsahem niklu. V diplomové práci také zkoumám zrychlené ochlazování ve vodě, kdy dosažené hodnoty, požadují zákazníci u náprav, kde je evropskou normou zakázán výskyt zakalené fáze ve struktuře výrobku.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Historie výroby železničních dvojkolí v Bohumíně

Jen pár kilometrů od Bohumína, ve Vítkovických železárnách, bylo v 19. století vyrobeno první železniční dvojkolí a začaly se psát dějiny výroby železničních kol a dvojkolí na našem území. 3D model běžného dvojkolí vidíme na **Obr. 1**. V padesátých letech 20. století zažívá Československý průmysl velký rozmach. Zatímco před válkou se v Československu vyrábělo cca 1,8 miliónu tun oceli ročně, v 80. letech už to bylo 15 miliónu tun. Od této doby má výroba oceli v ČR stále klesající trend, kdy v roce 2019 bylo vyrobeno o 8 % méně oceli než v roce předešlém tj. 4,6 mil. tun. Suroviny i výrobky se přepravovali výhradně po železnici, a tak začalo být zřejmé, že Československo potřebuje vlastní výrobu železničních kol a náprav, která obuje stovky nových lokomotiv a vagónů. Bylo jasné, že závod má být tím nejmodernějším v Evropě a tomu se přizpůsoboval výběr dodavatelů strojního parku. Dodavatelem technologie výroby železničních kol se stala anglická společnost Davy United. Dodavatel technologie výroby železničních náprav se stala československá společnost ŽŽDAS. Produkce výroby kol a náprav se se zvyšujícím zájmem zákazníku stále zvyšuje, kdy v roce 2020 bylo vyrobeno přes 46 tisíc surových železničních náprav a přes 186 tisíc železničních kol [2].

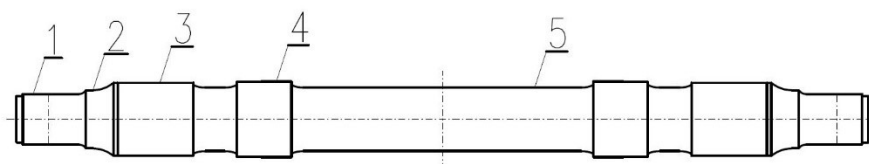


Obr. 1 3D model železničního dvojkolí

2.2. Charakteristika železničních náprav

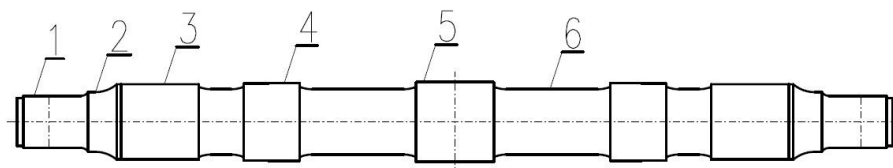
Železniční nápravy lze charakterizovat většinou jako výkovek splňující vysoké požadavky na jakost oceli. Velmi malé procento železničních náprav jsou vyráběny metodou válcování, valná

většina náprav jsou vyráběna kombinací převálcované kontinuálně odlité oceli a následně je materiál překován. Základní dělení náprav je dle smyslu použití a umístění na lokomotivě nebo vagónu – hnané či hnací nápravy. Mezi další dělení náprav patří také, zda se jedná o nápravy plné nebo duté. Duté nápravy disponují v řádu desítek kilogramů nižší hmotnosti. V neposlední řadě lze nápravy rozdělit dle charakteru použití, a to s ohledem, zda se jedná o nápravy používané pro přepravu osob, či nápravy pro nákladní dopravu. U náprav pro přepravu osob umocněné použitím na vlaky s vysokou provozní rychlostí je nutné se zaměřit na zvolený materiál a následně na jeho tepelné zpracování (zušlechtnění). U náprav pro nákladní přepravu s nižšími provozními rychlostmi okolo 100 km/h si vystačíme s materiálem obsahující méně legujících prvků s následným tepelným zpracováním k dosažení materiálových parametrů dle mezinárodních norem, Základní části hnaných náprav můžeme vidět na **Obr. 2**, který je dle pozic popsán níže. **Obr. 3** popisuje nápravu hnací.



Obr. 2 Kontura hnané nápravy

- | | |
|--------------------|--|
| Pozice 1 – ČEP | čep bývá nejmenším průměrem nápravy a slouží k uložení ložiskových domků, které jsou následně spojeny s podvozkem vagónu. |
| Pozice 2 – PRAŠNÍK | prašník navazuje na čep nápravy a slouží k zabraňování vniknutí nečistot do ložiskových domků. Na tento průměr nápravy se také lisují opěrné kroužky. |
| Pozice 3 – SEDLO | na sedla se lisují celistvá či složená železniční kola. Toto lisování je s přesahem nápravy oproti kolu za vysokých tlakových sil. |
| Pozice 4 – SEDLO | na tyto sedla se zpravidla lisují brzdové kotouče, pokud se jedná o vagón, který je brzděn starou metodou pomocí brzdových špalíků, náprava tyto sedla nemá. |
| Pozice 5 – DRŽÍK | jedná se o spojnicí mezi jednotlivými sedly |



Obr. 3 Kontura hnací nápravy.

- Pozice 1 – ČEP čep bývá nejmenším průměrem nápravy a slouží k uložení ložiskových domků, které jsou následně spojeny s podvozkem vagónu.
- Pozice 2 – PRAŠNÍK prašník navazuje na čep nápravy a slouží k zabránění vniknutí nečistot do ložiskových domků, Na tento průměr nápravy se také lisují opěrné kroužky.
- Pozice 3 – SEDLO na sedla se lisují celistvá či složená železniční kola. Toto lisování je s přesahem nápravy oproti kolu za vysokých tlakových sil.
- Pozice 4 – SEDLO na tyto sedla se zpravidla lisují brzdové kotouče, pokud se jedná o vagón, který je brzděn starou metodou pomocí brzdových špalíků, náprava tyto sedla nemá.
- Pozice 5 – SEDLO sedlo situováno uprostřed nápravy, slouží k nalisování náboje ozubeného kola, které je součástí převodové skříně, díky které je přenášen kroutící moment motoru žel. vozidla na nápravu.
- Pozice 6 – DŘÍK jedná se o spojnici mezi jednotlivými sedly

2.3. Materiály pro výrobu železničních náprav

Jako vstupní materiál pro výrobu železničních náprav se dle EN13261:2020 [3] nejčastěji používá ocel EA1N a EA4T. Zákazník také může požadovat jakost oceli EA1T, která je specifická svým tepleným zpracováním, tj. kalení s následným popouštěním. Vzhledem k mechanickým vlastnostem vyrobené nápravy bývají materiály EA1N určovány pro vagóny a hnané nápravy. Jakost EA4T případně EA1T bývají spojovány s hnacími nápravami a nápravami o rozměrech sedel větších než 250 mm.

2.3.1. Výkovek jakosti EA1N

Nejčastěji vyráběna jakost železničních náprav pro evropský trh. Používá se pro osobní a nákladní vagóny. Tato jakost je vyráběna dle evropské normy EN13261:2020 [3], která je ekvivalentem české normy ČSN EN 13261:2020 [3]. Tyto normy mimo jiné určují tepelné zpracování této jakosti a tj. normalizační žíhání. Po vykování je mikrostruktura oceli často nehomogenní a skládá se z velkých zrn a nežádoucích struktur, které obsahují např. předčasně vyloučené karbidy. Taková mikrostruktura má negativní vliv na mechanické vlastnosti oceli, ale i na její obrobiteľnosť. Pomocí normalizačního žíhání lze u oceli dosáhnout jemnějšího zrna a homogenní struktury s očekávanými vlastnostmi a obrobiteľnosť. Pro dosažení jemnější struktury lze předřadit druhé normalizační žíhání.

Chemickým ekvivalentem této jakosti je jakost EA1T, kdy chemické složení odpovídá jakosti EA1N, ale ocel je tepelně zušlechťena kalením s následným popouštěním. Díky tomuto tepelnému zpracování dosahuje jakost vyššími mechanickými vlastnostmi oproti výrobkům pouze normalizovaným. Tyto výrobky jsou, co se týče mechanických vlastností kompromisem mezi jakostmi EA1N a EA4T.

Maximální procentuální výskyt chemických prvků v oceli EA1N dle EN13261:2020 [3] je uvedeno v **Tab. 1**. Minimální požadované mechanické vlastnosti tepelně zpracovaných výrobků jsou uvedeny v **Tab. 2 – Tab. 4**.

Tab. 1 Mezní hodnoty chemického složení EA1N [3].

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V
max[hm%]	0,40	0,50	1,20	0,020	0,020	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06

Tab. 2 Hodnoty, které je třeba dosáhnout na středním poloměru plných náprav nebo ve střední vzdálenosti mezi vnějším a vnitřním povrchem u dutých náprav [3].

R_{eH} [MPa ²] ^a	R_m [MPa ²]	A_5 [%]
≥ 320	550 – 650	≥ 22
a pokud není zřetelná mez průtažnosti, musí se stanovit smluvní mez kluzu R_{p02}		

Tab. 3 Minimální hodnoty absorbované energie, které je třeba dosáhnout na středním poloměru plných náprav nebo ve střední vzdálenosti mezi vnějším a vnitřním povrchem u dutých náprav [3].

KU podélně [J]		KU příčné [J]	
Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Průměrná hodnota	Minimální hodnota
≥ 30	≥ 21	≥ 20	≥ 14

Tab. 4 Mezní napětí hodnot únav [3].

R_{fL} [MPa]	R_{fE} [MPa]	R_{fL}/R_{fE}
≥ 250	≥ 170	1,47

Minimální požadované mechanické vlastnosti tepelně zpracovaných výrobků oceli EA1T jsou uvedeny v **Tab. 5 – Tab. 7**.

Tab. 5 Hodnoty, které je třeba dosáhnout na středním poloměru plných náprav nebo ve střední vzdálenosti mezi vnějším a vnitřním povrchem u dutých náprav [3].

R_{eH} [MPa] ^a	R_m [MPa]	A_5 [%]
≥ 350	550 – 700	≥ 24
a pokud není zřetelná mez průtažnosti, musí se stanovit smluvní mez kluzu R_{p02}		

Tab. 6 Minimální hodnoty absorbované energie, které je třeba dosáhnout na středním poloměru plných náprav nebo ve střední vzdálenosti mezi vnějším a vnitřním povrchem u dutých náprav [3].

KU podélně [J]		KU příčné [J]	
Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Průměrná hodnota	Minimální hodnota
≥ 40	≥ 28	≥ 25	≥ 18

Tab. 7 Mezní napětí hodnot únav [3].

R_{fL} [MPa]	R_{fE} [MPa]	R_{fL}/R_{fE}
≥ 250	≥ 170	1,47

2.3.2. Výkovek jakosti EA4T

Tato jakost je charakterizována svým tepelným zpracováním – kalení s následným popouštěním. Tímto tepelným zpracováním jakost získává oproti jakosti EA1N mnohonásobně lepší mechanické vlastnosti, které jsou podmíněny minimálními požadavky dle EN13261:2020 [3]. Kalení je tepelné zpracování používané k dosažení vysoké tvrdosti a pevnosti oceli. Skládá se z austenitizace, rychlého ochlazení s následným popuštěním, za účelem získání popuštěné bainitické či martenzitické struktury.

Chemické složení jakosti EA4T jsou uvedeny v **Tab. 8**. V **Tab. 9** – **Tab. 11** jsou uvedeny minimální požadované vlastnosti tepelné zpracovaného výrobku.

Tab. 8 Mezní hodnoty chemického složení EA1T [3].

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V
max[hm%]	0,29	0,40	0,80	0,020	0,015	1,20	0,30	0,30	0,30	0,06

Tab. 9 Hodnoty, které je třeba dosáhnout na středním poloměru plných náprav nebo ve střední vzdálenosti mezi vnějším a vnitřním povrchem u dutých náprav [3].

R_{eH} [MPa] ^a	R_m [MPa]	A_5 [%]
≥ 420	650 – 800	≥ 18
a pokud není zřetelná mez průtažnosti, musí se stanovit smluvní mez kluzu R_{p02}		

Tab. 10 Minimální hodnoty absorbované energie, které je třeba dosáhnout na středním poloměru plných náprav nebo ve střední vzdálenosti mezi vnějším a vnitřním povrchem u dutých náprav [3].

KU podélně [J]		KU příčné [J]	
Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Průměrná hodnota	Minimální hodnota
≥ 40	≥ 28	≥ 25	≥ 18

Tab. 11 Mezní napětí hodnot únav [3].

R_{fL} [MPa]	R_{fE} [MPa]	R_{fL}/R_{fE}
≥ 350	≥ 215	1,63

2.3.3. Výkovky pro americký trh

V rámci konkurence schopnosti se evropské společnosti zabývající se výrobou železničních náprav snaží konkurovat americkým firmám. Z toho důvodu se při výrobě železničních náprav, můžeme setkat s jakostmi označovanými jako Grade F, Grade H, Grade G vycházející z americké normy AAR-M-101-90:2019 [4]. Tyto jakosti jsou charakterizované specifickým tepelným zpracováním dle výše uvedené normy. Grade F je tepelně zpracováváno normalizačním žíháním s následným popouštěním. U jakosti Grade G a Grade H jsou po vychladnutí na vzduchu nápravy znovu vystaveny ohřevu nad teplotu A_{c3} a následně po výdrži na této teplotě je výrobek kalen ve vodě. Jako poslední operaci jsou výrobky popouštěny. U jakosti Grade G jsou výrobky kaleny s následným popouštěním, po vychladnutí na vzduchu jsou výrobky znovu vystaveny ohřevu pod názvem subkritické žíhání, tentokrát je ohřev pod teplotou A_{c1} . Následuje okamžité ponoření náprav do vody. Účelem je snížení hodnot zbytkového napětí v nápravě a zachování této nízké úrovně napětí.

3. VÝROBA ŽELEZNIČNÍCH NÁPRAV U NÁS A VE SVĚTĚ

3.1. Hornotlaký lis společnosti ŽDAS

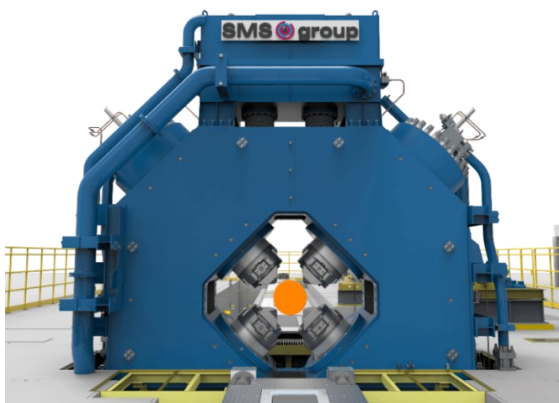
Jednou z možností je hydraulický kovářský lis CKNV 1000, což je upravený čtyřsloupový hornotlaký lis pro volné kování s jednotkovým pohonem **Obr. 4**. Je vybavený sadou speciálních nástrojů pro kování železničních náprav integrovaný s kovářským manipulátorem QKK 1,5 s otočným výsuvným zvedacím stolem. Po vykování prochází náprava řízeným tepelným zpracováním. Celý proces je pro dosažení optimálních mechanických vlastností pod kontrolou počítače. To umožňuje kování na záznam, při němž je postup kování zapsán do paměti řídicího systému pro automatické kování dalších kusů.[5]



Obr. 4 Hornotlaký lis CKNV 1000 [5].

3.2. Radiální rychlokovací lis Vítkovice Heavy Machinery

Vítkovice Heavy Machinery vyrábí železniční nápravy pomocí radiálního rychlokovacího lisu **Obr. 5**. Na **Obr. 6** lze vidět reálně umístěný radiální lis v hale. Náhřev kontislitků či ingotů probíhá v karuselové peci. Pro sázení i vyjímání vstupního materiálu slouží manipulátor, který po ohřevu na tvářecí teplotu pokládá vstupní materiál na válečkový dopravník. Materiál je dopraven k manipulátoru. Železniční nápravy jsou kovány v násobných délkách, a to jako dvoj násobky, trojnásobky či čtyřnásobky. K eliminaci pokřivení náprav při kování dlouhých výkovků disponují Vítkovice dvěma manipulátory. Nástroje kovacího lisu jsou z nástrojové oceli třídy 19 [6], na kterou navařují speciální žáruvzdorný a ořuvzdorný materiál díky, kterého mají kovádla vyšší životnost. Kovadla mají speciální tvar, díky kterého tvoří daný průměr nápravy dle míry sevření. Délka kovádel je 600 mm – minimální délka dříku, či čepu mezi nápravami je daných 600 mm. Tepelné zpracování probíhá v peci s výjezdnou nístějí. Při kování tří nebo čtyřnásobku délky nápravy je nutné nápravy krátit na dvojnásobky, a to z důvodu rozměru pecí tepelného zpracování [7].



Obr. 5 Radiální rychlokovací lis SMS [7]. **Obr. 6** Rychlokovací lis SMS MEER [7].

3.3. Tayiuan Heavy Industry Railway Transit Equipment Co Ltd.

První výrobní linka nápravy byla postavena v roce 1989 a získala „Druhou cenu národního ocenění za vědecký a technologický pokrok“. Tato výrobní linka je vybavena vysokorychlostními kotoučovými pilami na nápravy, prstencovou topnou pecí, horizontálním přesným kovacím strojem nápravy, který lze vidět na **Obr. 8** a průběžnou pecí pro tepelné zpracování, které tvoří první plně automatickou výrobní linku na kování na světě. Výrobní linka je schopna vyrábět železniční nápravy, jak pro městské železnice, tak pro vysokorychlostní nápravy [8].

V roce 2015 společnost nezávisle navrhla a postavila druhou výrobní linku s rychlokovacím lisem **Obr. 7** pro výrobu železničních náprav. Tato výrobní linka má širokou škálu adaptability a flexibilního režimu organizace výroby, který dokáže uspokojit výrobu různých produktů náprav. Mezi hlavní zařízení výrobní linky patří kruhová topná pec, kovací stroj, linka pro normalizační žíhání, kalení a popouštění. Elektrická topná pec pro tepelné zpracování je vybavena pokročilou konstrukční technologií, přesnou regulací teploty a vysokou rovnoměrností ohřevu [8].



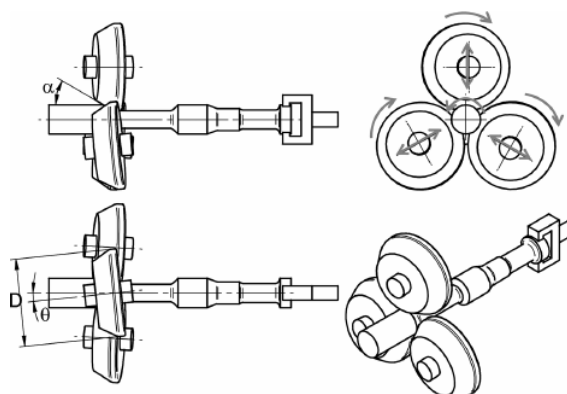
Obr. 7 Rychlokovací stroj [8].



Obr. 8 Kovací stroj pro výrobu žel. náprav [8].

3.4. Numerická analýza výroby železničních náprav kosým válcováním

Železniční náprava je specifická svými různými průměry po své délce. Tato metoda je založena na procesu kosého válcování. Železniční náprava je vyráběna pomocí třech kuželových válců umístěnými každých 120° na obvodu vstupního materiálu tedy kulatiny. Polohu válců vidíme na **Obr. 9**. V poloze nakloněné k ose kulatiny se válce otáčejí stejným směrem a stejnou rychlostí. Zároveň se přibližují nebo oddalují v závislosti na požadovaném zmenšení průřezu nápravy. Kromě toho je surová náprava posunutá podélně vzhledem k válcům translačním pohybem upínacího sklíčidla. Za účelem ověření navržené metody výroby železničních náprav byla pomocí Simufact provedena řada numerických simulací. Simulační software pro formování v.12. Numerické modelování umožnilo stanovení map účinného přetvoření a teploty v hotovém výrobku, jakož i změn zatížení a momentů během válcování. Numerické výsledky jednoznačně potvrzují, že metodou zkoseného válcování lze aplikovat na díly i značných rozměrů (modelované nápravy měly délku 2146 mm a jejich maximální průměr byl 202 mm) [9].



Obr. 9 Poloha válců při kosém válcování železniční nápravy [9].

4. VÝROBA ŽELEZNIČNÍCH NÁPRAV V GHH – BONATRANS GROUP A.S.

4.1. Příprava vstupního materiálu

Na pracovišti přípravy vsázky probíhá vstupní kontrola čtvercových bloků. Ocel používaná společností GHH – Bonatrans Group a.s je vakuovaná plynule kontinuálně odlitá do kontislitků s průřezem 410 mm nebo 525 mm a následně převálcována do předvalků čtvercového průřezu, výjimečně do předvalků kruhových. Hlavním dodavatelem vstupního materiálu jsou Třinecké železárny a.s. Průřez vstupního materiálu je určován technologií dle největšího průřezu vykované nápravy, ve společnosti se používají kvadráty 150 x 150 mm – 300 x 300 mm. Na **Obr. 11** vidíme skladovací prostory převálcovaných bloků, které jsou uloženy na sebe a označeny ražením a etiketou, která obsahuje veškeré informace o daném bloku. [10]

Během vstupní kontroly jsou proměřeny všechny rozměry – průřez ve třech pozicích a délka. Naměřené rozměry jsou porovnávány s předepsanými hodnotami, které musí bloky splňovat. Pracovníci přípravy vsázky také kontrolují naražené značení bloku, které bylo naraženo za tepla. Kontroluje se číslo tavby, pořadové číslo, počet kusů předvalků a jakost. Tyto údaje jsou porovnávány s údaji na ložném listě vagónu. Dále pracovníci kontrolují vizuálně jednotlivé předvalky, kde kontrolují různé povrchové vady, jako jsou přeložky, praskliny a případně velikost apretace. Pracovníci technické kontroly dále kontrolují dodací listy s požadavky společnosti, zda souhlasí chemické složení, hmotnosti počty v dávce, namátkově také kontrolují rozměry bloků. Tyto požadavky, jsou dány evropskými případně jinými normami. Mezi nejčastější normy, dle kterých probíhá výroba železničních náprav patří

EN 13261:2020 [3], AAR-M-101-90:2019 [4]. Po takto provedené kontrole jsou předvalky skladovány na skladě a uvolněny k výrobě.



Obr. 10 Skladovací prostory předvalků.

4.2. Ohřev materiálu

Ohřev vstupního materiálu probíhá v krokové ohřívací peci **Obr. 12**. Do pece se sází cca 40ks bloků. U větších rozměrů je třeba brát v potaz delší dobu nánřevu a maximální zatížení nístěje pece, podle těchto kritérii jsou v peci různé mezery mezi jednotlivými kroky krokového mechanismu. Jako spalovací složky pro vysokorychlostní hořáky je používán zemní plyn společně s předeřřátým kyslíkem. Kyslík je předeřříván na 300 °C v rekuperátoru, který je umístěn ve spalovacích cestách. Pec je vybavená automatickou regulací teploty, tzn. hořáky se zapalují nezávisle na sobě a termočlánky v peci přenáší teplotu do ovládacího panelu pece, ten určuje, který hořák, v jaký moment zapálí. Pec má čtyři zóny, první zóna není vybavena hořáky, a tedy je nevyhřívána a zbylé tři zóny, mají po stranách plynové vysokorychlostní hořáky. Teplota se nastavuje dle předepsané technologické normy, zodpovědnost za správné nastavení teplot a doby pobytů předvalků v peci je pecař. Nastavena teplota může být maximálně 1320 °C. [11]



Obr. 11 Kroková ohřívací pec.

4.3. Kování náprav

Následující operace v materiálovém toku kovárny náprav je kování. Pro zajištění co nejvyšší kvality povrchu, je před samotným kovááním zařízení na odstranění okují. Toto zařízení má za úkol, co nejefektivněji odstranit oxidy železa na povrchu, známé jako primární okuje. Hlavní částí zařízení pro odstraňování okují je pohyblivý ostříkový věnec, který je osázen vysokotlakými tryskami, pomocí kterých jsou okuje odstraněny. Předvalek po odokoujení je dále dopravován válečkovým dopravníkem ke kovacímu lisu. Po uchopení materiálu do čelisti manipulátoru, začíná operace kování. V praxi se nedoporučuje začít kovat nápravu z materiálu, který je déle než 4 minuty mimo ohřívací pec, z důvodu rizika nízké dokovací teploty. Nejnižší teplota nápravy po vykování by neměla podkročit dolní kovací teplotu. [6] Tato teplota je měřena pyrometrem umístěným v lince kovacího lisu a je zobrazována do kabiny přednímu kováři. [12]

Kování náprav se provádí na kovacím lise CKN 800, který byl vyroben ve společnosti ŽĐAS. Jedná se o hydraulický kovací lis o jmenovité síle 8 MN s počtem hladicích zdvihů 100 – 110 za minutu. Lis včetně manipulátoru ovládá operátor pomocí ovládacího panelu s monitorem, a to v ručním, poloautomatickém či automatickém režimu. Ofukování okují při samotném kování probíhá pomocí stlačeného vzduchu. Technologie kování probíhá překováním čtvercového průřezu na průřez kruhový, asi 2/3 délky bloku. Proběhne výměna kovadel, probíhá kování čepu a prašníku na první straně nápravy. Takto překovaný blok je umístěn na točnu, kde je výkovek otočen **obr. 13**. Následně probíhá překování čtvercového průřezu zbytku bloku na průřez kruhový. Následně je vykován po celé délce průměr sedla, což je část nápravy s největším průměrem. Při tomto kování se horní a spodní zápustka dotýká styčnými plochami. Každý kovací postup má určené typy kovadel dle průměru tzn. při dotyku styčných ploch je zajištěný přesný průměr, který je požadován. Při dokování průměru sedla proběhne výměna sady kovadel, lis disponuje třemi sadami kovadel. Po automatické výměně další sady je vykován průměr ve středu nápravy tzn. dřík. Čep a prašník na druhé straně nápravy jsou vykovány jako poslední operace. Na přesnosti kování, stavu a kvalitě kovadel závisí kvalita vyrobených surových náprav.[12]



Obr. 12 Překování 2/3 délky bloku.

4.4. Pálení konců náprav, značení

Vykovaná náprava se pomocí válečkového dopravníku přesune k pálicímu stroji. Jedná se o plně automatický stroj, který nápravu přesune na dvě prizmata, kam náprava zapadne, aby došlo k vycentrování lze vidět na **Obr. 14**. Následně je náprava proměřena pomocí laseru po celé její vykované délce. Po proměření pálicí stroj automaticky nalezne střed nápravy a od něho vypočítá místa upálení, aby byl upálen odpad, který sloužil jako technologický přídavek pro kování nápravy. Po upálení má náprava předepsanou délku určenou technologem. Pálicí stroj je napojen na zemní plyn a centrální rozvod kyslíku. Po upálení obou přídavků je náprava převezena na řetězovém dopravníku zpět, na válečkový dopravník a pokračuje k razicímu zařízení. Jelikož se jedná o plynové zařízení, i u tohoto plně automatického stroje musí být obsluha, která dohlíží na plynulý chod zařízení.



Obr. 13 Pálicí stroj MESSER.

Razicí zařízení na **Obr. 15**, slouží k označení surových náprav za tepla, díky kterého je každá náprava sledovatelná po celou dobu její výroby. Náprava je pomocí vzduchového válce umístěna na prizmata, díky kterým je ražení umístěno vždy dle požadavků uprostřed čepu

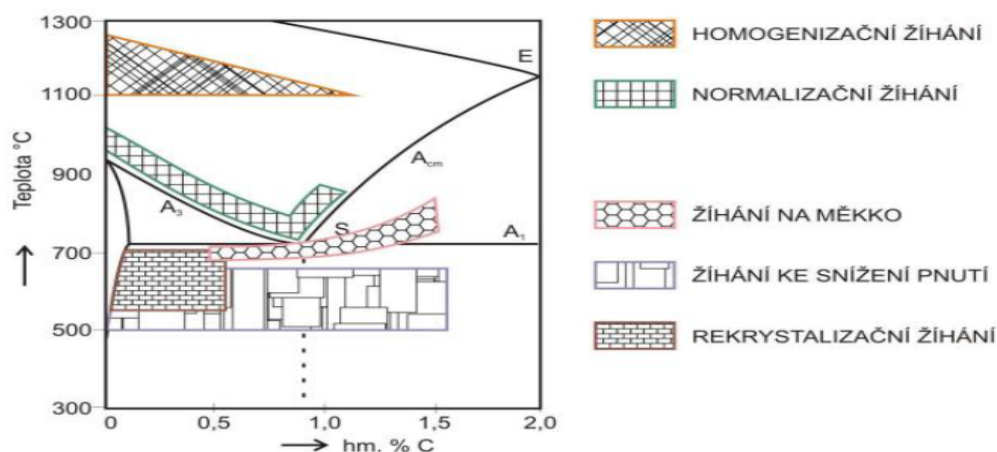
nápravy. Jako první je naraženo číslo tavby společně s kovací postupem – tento údaj je pro celou dávku vždy stejný, proto jsou v hlavě ražení umístěné raznice, které se při výrobě daného kovacího postupu nemění. Následuje ražení pořadového čísla pomocí hlavy, která má revolverový zásobník s raznicemi a tyto raznice se vždy natočí tak, aby byl každý vyrobený kus označen jedinečným číslem [12].



Obr. 14 Razicí zařízení surových náprav.

4.5. Tepelné zpracování železničních náprav

Nápravy z důvodu transformace struktury turbulentní deformací po kování, musí minimálně jednu hodinu pomalu chladnou na chladicím dopravníku, za značícím zařízením. Surové nápravy pokračují na chladicím dopravníku směrem ke vstupu krokových žíhacích pecí. Na základě požadavků zákazníka, dle platných norem jsou nápravy normalizačně žíhány, kaleny a následně popouštěny. Dle americké normy AAR-M-01:2019 [4] může zákazník požadovat násobné tepelné zpracování, jako je dvojí normalizační žíhání, nebo normalizační žíhání s následným kalením a popouštěním. Úkolem tepelného zpracování náprav je především zjemnění mikrostruktury, vznik nových struktur uhlíku, snížení úrovně zbytkových napětí, zvýšení pevnosti či houževnatosti. Definování tepelného režimu je jeden z nejdůležitějších postupů, který vede k tomu, aby byly splněny požadavky zákazníka, respektive normy, dle kterých jsou nápravy vyráběny. Určení teplotního režimu pro jednotlivé typy tepelného zpracování probíhá na základě chemického složení dle diagramu Fe – Fe₃C viz **Obr. 16**. Délky pobytu v jednotlivých zónách jsou závislé na rozměrech nápravy a její hmotnosti [13].



Obr. 15 Žihací teploty v diagramu Fe – Fe₃C [14].

Výroba železničních náprav, co se týče samotného kování a chladnutí před tepelným zpracováním je totožná u všech jakostí. Po vychladnutí a ukončení veškerých strukturních změn po kování jsou nápravy přemístěny před krokové průběžné pece tepelného zpracování. Nyní nastává chvíle, od které se začínají odvíjet finální podoby výsledného výrobku, co se týče metalurgických a fyzikálních vlastností.

Režimy tepelného zpracování

Režimy tepelného zpracování jsou vypracovány na základě chemického složení, rozměrů a hmotnosti výrobků.

Normalizační žihání

Normalizační žihání má za cíl dodat oceli homogenní a jemnozrnnou strukturu. Bývá spojeno s nápravami z uhlíkových ocelí jakosti EA1N dle EN 13261:2020 [3], jakosti Grade F a Grade H dle AAR-M-101:2019 [4]. Tento proces se používá k dosažení požadované mikrostruktury a zajištění mechanických vlastností oceli. V případě železničních náprav se po vykování jedná o nejčastější tepelné zpracování. Normalizační teplota se volí obvykle 30 až 50 °C nad teplotou přeměny A_{c3} , přičemž reálná technologická teplota se zvyšuje o vliv rozměrů a hmotnosti nápravy. Výdrž na normalizační teplotě je různá podle druhu oceli a hlavním parametrem pro nastavení doby výdrže je největší průměr výrobku. Pro větší výkovky jako jsou železniční nápravy o průměrech 200–300 mm, jsou doby výdrže mezi 1,5 – 3 hodinami. Požadavek zákazníka je feriticko perlitická struktura, která neobsahuje stopy fází zakalené struktury jako je bainit a martenzit. Při zvyšování nároků zákazníku na mechanické vlastnosti výrobků často

vzniká problém zakalené struktury, výše zmíněné fáze popuštěného bainitu, která může vést ke zkřehnutí, tedy ke snížení vrubové houževnatosti.

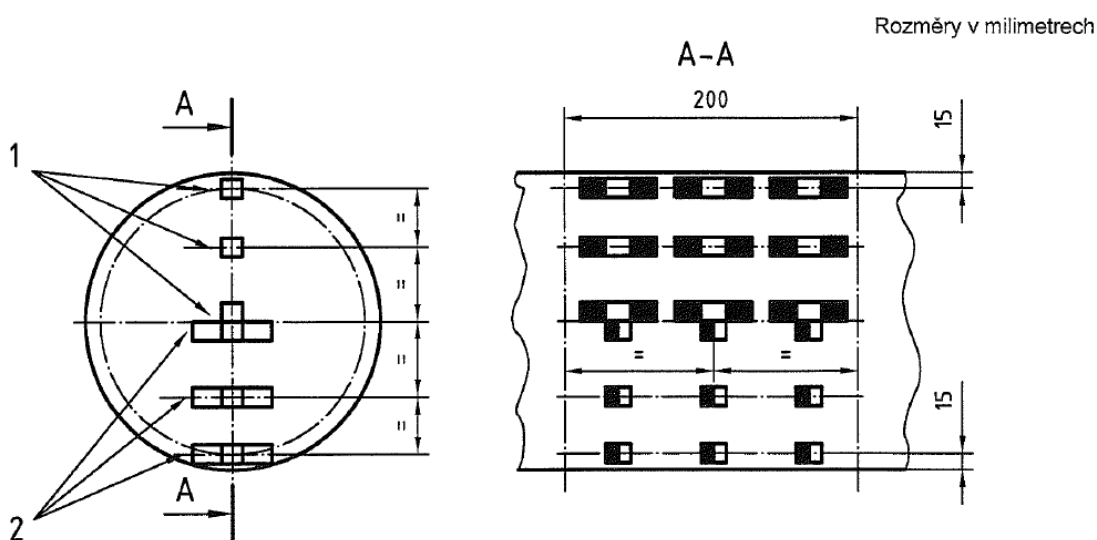
Kalení s následným popouštěním

Tepelné zušlechťení, je tepelné zpracování používané k dosažení vysoké tvrdosti/pevnosti oceli. Skládá se z austenitizace, rychlého ochlazení a popouštění, za účelem získání popuštěného martenzitu či bainitické struktury. Podmínkou správného zakalení je v první fázi ohřev nad teplotou A_{c3} minimálně o 50 °C u oceli podeutektoidních, případně o 50 °C nad A_{c1} u oceli nadeutektoidních. Dále je potřebná dostatečná doba výdrže, která je totožná jako u normalizačního žíhání, pomocí které musí dojít k austenitizaci v celém průřezu nápravy. Čím více se překročí při ohřevu na kalení austenitizační teplota nad předepsanou hranici, tím výrazněji se vyvinou při zakalení martenzitické jehlice, a tím je také po tepelném zpracování ocel křehčí. Po ohřevu na kalicí teplotu se výkovky ochlazují v takovém prostředí, které zaručuje dosažení horní kritické ochlazovací rychlosti pro použitou ocel. Pro kalení železničních náprav se nejčastěji používá proudící voda, dmýchaný olej nebo vzduch.

Při zušlechťování následuje po kalení popouštění, u kterého zvlášť záleží na přesnosti provedení, poněvadž výsledné mechanické vlastnosti značně závisí na popouštěcí teplotě. Důležitým parametrem při popouštění je nastavená teplota. Správné určení popouštěcí teploty lze zjistit, až po destruktivním zkoušení výrobků. Výsledné mechanické vlastnosti nám vypoví správné nastavení teplot. Proto jsou tyto teploty významným know – how společnosti. V případě nesplněných požadavků na výrobek, musí být provedeno přepracování všech výrobků dané dávky s pozměněným režimem tepelného zpracování. Tímto ověřováním se technologie společnosti s každým novým režimem tepelného zpracování „učí“ a výsledky může použít pro nastavení dalších režimů u podobného výrobků. Tato metoda je nazývána BEST PRACTICE. Menší vliv na konečné mechanické vlastnosti, než výše popouštěcí teploty má výdrž na popouštěcí teplotě. Obvykle se u železničních náprav v praxi používá výdrž mezi 2–3 hodinami.

Po výdrži na popouštěcí teplotě následuje nejčastěji ochlazování na vzduchu. Výjimku tvoří slitinové oceli s vyšším obsahem Cr, Mn případně Ni, u nichž by ochlazování na vzduchu způsobilo značný pokles houževnatosti tzn. popouštěcí křehkosti. K omezení vzniku popouštěcí křehkosti, je nutno u tohoto druhu oceli uvažovat o řízeném rychlejším ochlazování obvykle s použitím studeného vzduchu případně ve vodě. Rovněž přítomnost Mo v oceli min. 0.1% má příznivý vliv na potlačení popouštěcí křehkosti.

Po procesu kalení nám velmi klesá vrubová houževnatost, kterou zákazníci provozující železniční dvojkolí v severních arktických zemích požadují dle přísných technických podmínek přejímky výrobků. Standardní zkoušení vrubové houževnatosti náprav (zkušební tělesa KU5) probíhá při $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zákazníci s vyššími požadavky také požadují splňující vrubovou houževnatost při teplotách vzorku $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zkušební tělesa KV2). Schéma odběru z železniční nápravy vidíme na **Obr. 17**, kdy 1 – podélné umístění, střed vzorku pod povrchem je umístěn 15 mm od povrchu, druhý vzorek je umístěn v polovině poloměru a třetí je ve středu největšího průřezu nápravy, 2 – u příčného umístění je rozmístění vzorku totožné [3].

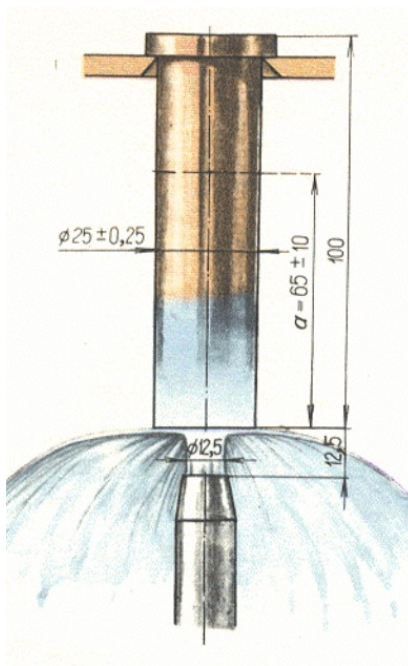


Obr. 16 Metoda odběru zkušebních vzorků vrubové houževnatosti [3].

Prokalitelnost

Prokalitelnost je schopnost dosáhnout po kalení v určité hloubce pod povrchem tvrdosti odpovídající kalitnosti dané oceli, při 50 % martenzitu ve struktuře. Prokalitelnost bude v první řadě závislá na tvaru diagramu ARA, čímž bude inkubační doba delší, tj. křivky Ps a Bs více vpravo, tím větší hloubky zakalené vrstvy dosáhneme při stejné rychlosti ochlazování. Je to proto, že rychlost ochlazování předmětu na jeho povrchu je dána kalícím prostředím, a to podle toho, jak rychle je schopno odnímat teplo z povrchu oceli. Naproti tomu rychlosti ochlazování uvnitř průřezu v určitých vzdálenostech od povrchu jsou dány tepelnou vodivostí oceli a samozřejmě teplotním rozdílem mezi daným místem a povrchem. Na tvar diagramu ARA mají velký vliv přísadové prvky a budou proto určovat prokalitelnost ocelí. Veškeré prvky, s výjimkou kobaltu, které se rozpouštějí v austenitu, zpomalují rozpad austenitu, prodlužují inkubační doby a posunují rozpadové křivky doprava k delším časům. Snižují tedy kritickou rychlost ochlazování. Na prokalitelnost má ještě značný vliv velikost austenitického

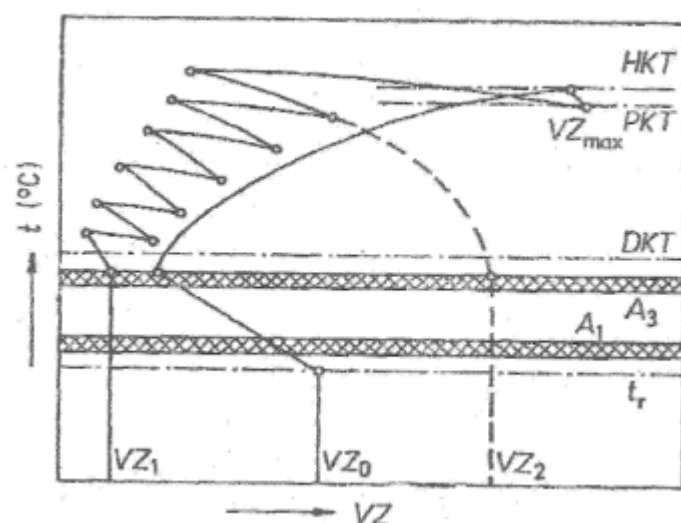
zrna. Čím bude zrno jemnější, tím bude vyšší kritická rychlost a naopak. Avšak druhým způsobem zvyšování prokalitelnosti nadměrným zvětšením zrna, vede k výraznému zhoršení mechanických vlastností, zejména vrubové houževnatosti. Protože jednotlivé tavby oceli stejné značky se od sebe poněkud liší chemickým složením, bylo by nutné zjišťovat křivku ARA pro každou tavbu a kontrolovat, zda odpovídá normou předepsané prokalitelnosti. Stanovení křivek ARA je zdlouhavé, a proto byla vypracována a normalizována čelní zkouška prokalitelnosti **Obr.18.** [15]



Obr. 17 Čelní zkouška prokalitelnosti [14].

5. STRUKTURNÍ ZMĚNY PŘI KOVÁNÍ

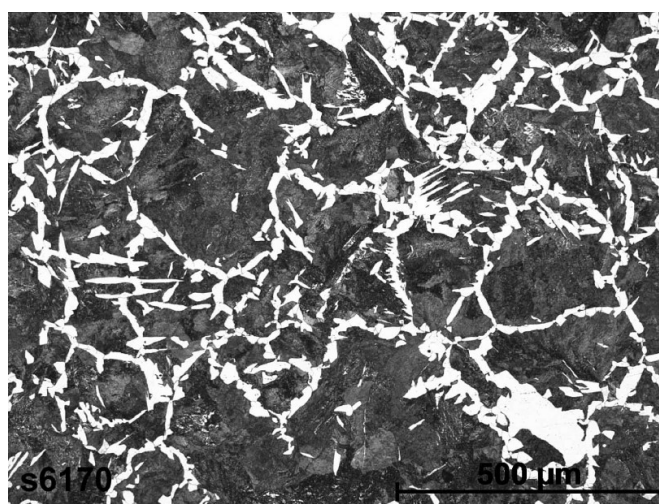
Kováním se ovlivňuje i velikost zrna (VZ), a tím i výsledné mechanické vlastnosti oceli. Současný vliv teploty a způsobu kování znázorňuje graf **Obr. 19**. Výchozí polotovár o velikosti zrna VZ0 se zahřívá na horní kovací teplotu, která leží vysoko nad rekrytalizační teplotou, což vede k zhrubnutí zrna na VZ max. Následným kováním se zrno zjemňuje, ale v krátkých přestávkách mezi jednotlivými údery opětovně roste. Vzhledem k poklesu teploty kovaného polotovaru je však tento růst stále menší. Z tohoto důvodu je ve snaze kováře dokovat výkovek s teplotou lehce na 850 °C. Při této optimální dokovací teplotě dosahuje zrno výsledné velikosti $VZ1 < VZ0$. [16]



Obr. 18 Růst zrna při kování [16].

Na **Obr. 19** lze vidět růst zrna při kování, zkratka HKT je horní kovací teplota, PKT je počáteční kovací teplota, DKV je dolní kovací teplota, t_r je teplota rekrystalizace.

Při splnění výše uvedených podmínek kování, můžeme vidět na **Obr. 20** mikrostrukturu vykované nápravy bez tepelného zpracování.



Obr. 19 Mikrostruktura vykované nápravy bez tepelného zpracování.

Struktura je nehomogenní v rámci odebraného vzorku. Na **Obr. 20** lze spatřit ferit po hranicích perlitického zrna. Zrna feritu jsou převážně protáhlého polyedrického tvaru na hranicích perlitického zrna. Pilovité výběžky feritu na hranicích perlitického zrna a Widmannstättenovy jehlice jsou detekovány ve více směrech.

Mezi hlavní výhody kovaných železničních náprav patří vysoká přesnost opakování, vysoká spolehlivost – výsledná struktura a mechanické vlastnosti oceli, automatická změna kovadel pro kování rozdílných průměrů. [17]

Velikost a rovnoměrnost austenitického zrna ovlivňuje rozhodujícím způsobem nejen mechanické vlastnosti ocelí za studena, ale i metalurgické důsledky tváření za tepla. S klesající velikostí zrn se urychlují uzdravovací procesy, snižuje se množství nečistot na jednotku povrchu zrn a úměrně se zlepšují plastické vlastnosti, naopak deformační odpor se mírně zvyšuje. Růst austenitického zrna ovlivňují technologičtí činitelé (parametry ohřevu, velikost deformace) a metalurgičtí činitelé (chemické složení, čistota oceli, strukturní stav) [18].

Standardní metodou stanovení velikosti zrna ve firmě je metoda dle ČSN EN ISO 643 [19].

Odběr zkušebních vzorků

Odběr zkušebních vzorků se řídí požadavky zákazníka, které jsou uvedeny v technických specifikacích případně v normách.

5.1 Stupeň prokování

Pro získání optimální struktury kované oceli je důležitým ukazatelem stupeň prokování, který je vyjadřován poměrem počátečního průřezu vstupního materiálu nejčastěji plynule odlitého kontislitku nebo ingotu, ke konečnému největšímu průřezu výkovku. Stupeň deformace je při kování v průřezu výkovku nerovnoměrný. Pro stanovení vlivu prokování na mechanické vlastnosti výkovku, lze vycházet z faktu, který na nerovnost deformace nebere ohled. Bylo dokázáno experimentálními pokusy, že při zvolení vhodné technologie a běžných stupňů prokování je nerovnost deformace poměrně malá [20].

Stupeň prokování je bez jednotková veličina, minimální stupeň prokování železničních náprav pro evropsky trh je 3, který zaručuje požadované vlastnosti. Vyšší stupeň prokování požadují například indické dráhy – 4. Základní výpočet stupně prokování volného kování, který nebere zřetel na prodloužení výkovku lze vyčíst z rovnice (1) a stupeň deformace v rovnici (2) [20].

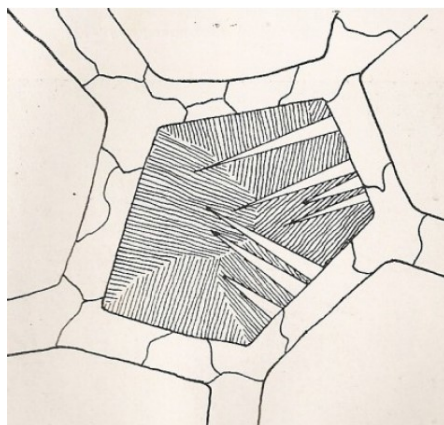
$$K = \frac{S_0}{S_k} \quad (1)$$

$$\varepsilon = (S_0 - S_k) / S_0 * 100 [\%] \quad (2)$$

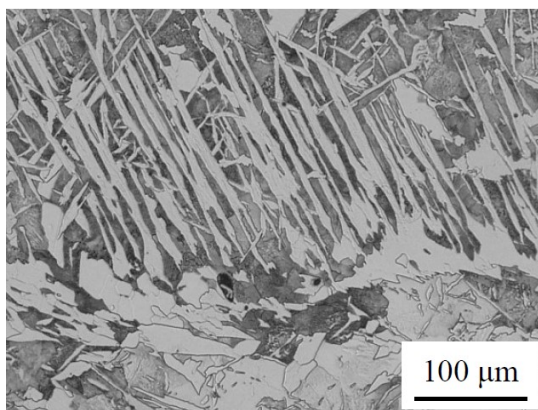
Kde p je stupeň prokování, ε je stupeň deformace [%], S_0 je počáteční průřez kontislitku či ingotu, S_k je konečný průřez výkovku.

5.2. Mikrostruktura s Widmannstättenovy jehlicemi

Widmannstättenův ferit vzniká vždy intergranulárně, tedy na hranicích zrn austenitu. Ke tvorbě Widmannstättenového feritu dochází, je-li rychlost ochlazování větší a zrno hrubé (má tedy velké dráhy pro difúzi uhlíku). Za těchto podmínek probíhá vylučování feritu po štěpných plochách austenitických zrn a tvoří se v nich feritické „šipky“. Tyto jsou schematicky znázorněny na **Obr. 21**. Pokud byla ocel silně přehřátá a poměrně rychle ochlazená, jsou tyto feritické „šipky“ poměrně dlouhé a také četné, takže protínají celé zrno a tvoří charakteristické obrazce. Widmannstättenova struktura **Obr. 22** se nejčastěji vyskytuje u odlitků ve stavu po odlití (hrubé primární zrno) a v tepelně ovlivněné oblasti svarových spojů (zhrublé zrno a relativně vysoká rychlost ochlazování). Tato struktura je nežádoucí, protože vede většinou ke zkřehnutí oceli (pokles vrubové houževnatosti). Widmannstättenovu strukturu lze eliminovat následným normalizačním žháním. Nelze ji odstranit žháním bez překrystalizace [21].



Obr. 20 Feritické šipky po hranicích austenitických zrn [21].



Obr. 21 Widmannstättenová struktura [21].

6. CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem práce je analyzovat a následně optimalizovat tepelné zpracování za účelem zlepšení mechanických vlastností u železničních náprav vyráběných kombinací zápusťkového a volného kování ve společnosti GHH-BONATRANS GROUP a.s. v návaznosti na zvyšování požadavků zákazníků železničních náprav.

Experimentální část se skládá ze dvou na sobě závislých rozborů struktury a mechanických vlastností oceli EA1N. První část se zabývá analýzou struktury a mechanických vlastností u vstupního materiálu pro železniční nápravy, dále analýza před tepelným zpracováním a následně po normalizačním žíhání, které je nastaveno dle standardů společnosti. Druhá část se zabývá optimalizací tepelného režimu, za účelem zvýšení mechanických vlastností a získání jemnější struktury a eliminaci widmannstättenových jehlic v mikrostruktuře u oceli jakosti EA1N.

V druhé části experimentální práce je cílem dokázání výrazného zlepšení mechanických vlastností a mikrostruktury optimalizací chemického složení, které je stále v rámci evropské normy EN13261:2020 [3]. Cíl práce byl nastaven dle přísných požadavků zákazníka, k získání výborných mechanických vlastností. Zejména požadavek na provedení zkoušek vrubové houževnatosti při minusových teplotách, poměru pevnosti/houževnatosti při eliminaci fáze popuštěného bainitu a martenzitu.

Cílem třetí části experimentální práce je ověřit vlastnosti chemického ekvivalentu jakosti EA1N a to EA1T, která se liší v tepelném zpracování. U jakosti EA1T je předepsáno kalení s následným popouštěním. Díky tomuto tepelnému zpracování dostává jakost vyšší mechanické vlastnosti, zejména vrubovou houževnatost a únavové vlastnosti výrobku. Dílčím cílem třetí části experimentální práce bylo porovnání zrychleného ochlazování pro jakost EA1N.

7. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

7.1. Analýza mechanických vlastností a rozboru struktury předvalku pro železniční nápravy a surové nápravy

Popis

Rozbor mechanických vlastností a mikrostruktury byl proveden na předvalku 240x240 mm **Obr. 23**, který byl převálcován z kontinuálně odlité oceli o kruhovém průřezu 530 mm. Chemické složení odpovídá oceli EA1N dle EN13261:2020 [3]. Kvadrát 240x240mm byl vybrán na základě nejrozšířenějšího vstupního materiálu na úseku kovárny náprav ve společnosti GHH-BONATRANS a.s. Z výše uvedeného vstupního materiálu byly odebrány vzorky pro destruktivní zkoušení mechanických vlastností a rozboru mikrostruktury. Byly odebrány vzorky pro získání výsledků vrubové houževnatosti, tahové zkoušky, chemické analýzy, rozbor mikrostruktury. Všechny vzorky byly odebrány dle odebracího předpisu normy EN13261:2020 [3]. Cílem dílčího experimentu bylo získání vstupních vlastností oceli, které je zapotřebí kování zlepšit, a pomocí tepelného zpracování zušlechtit.



Obr. 22 Vstupní materiál pro kování náprav – blok 240x240mm.

7.1.1. Rozbor vlastností vstupního materiálu

Vrubová houževnatost bloku

Zkušební vzorky KU5 – toto označení popisuje, že se jedná o vzorek opatřený U vrubem o poloměru 5 mm, vzorky byly odebrány pod povrchem bloku, v polovině čtvercového průřezu a ve středu bloku. Následně byly provedeny zkoušky vrubové houževnatosti (charpyho kladivo), pomocí kterých byla vyhodnocena energie, která byla potřebná pro přerušení zkušební vzorku. Výsledné hodnoty vrubové houževnatosti jsou uvedeny níže v **Tab. 12**.

Tab. 12 Vrubové houževnatosti bloku.

Umístění vzorku na bloku	Orientace tělesa	Teplota zkušební vzorku	Typ vzorku	Nárazová práce
Pod povrchem	podélný	20 °C	KU5-300 10x10	17 J
Polovina čtv. průřezu	Podélný	20 °C	KU5-300 10x10	22 J
Střed	Podélný	20 °C	KU5-300 10x10	28 J
Pod povrchem	Příčný	20 °C	KU5-300 10x10	8 J
Polovina čtv. průřezu	Příčný	20 °C	KU5-300 10x10	11 J
Střed	Příčný	20 °C	KU5-300 10x10	23 J

Tahová zkouška bloku

Zkouška tahem byla provedena podle ČSN EN ISO 6892-1 [22] na trhacím stroji INSTRON 5985. Teplota prostředí $23 \pm 5^\circ\text{C}$. Odběr těles byl proveden podle ČSN EN ISO 683-1 [23]. Vzorky byly odebrány z bloku pod povrchem, v polovině čtvercového průřezu a ve středu bloku. Cílem zkoušení bylo získat mez pevnosti a tažnost zkoušeného bloku, tyto i ostatní dílčí výsledky jsou uvedeny v **Tab.13**.

Tab. 13 Výsledné hodnoty tahové zkoušky bloku.

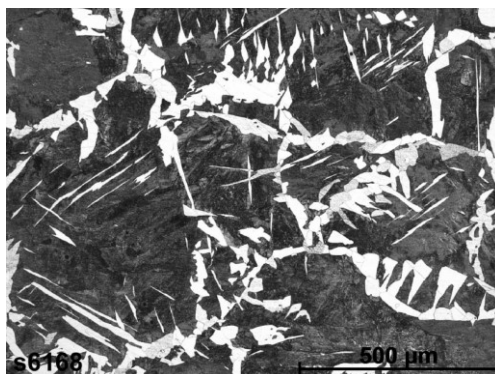
Umístění vzorku na bloku	Průměr d_0 [mm]	Průřez S_0 [mm ²]	Počáteční měřená délka L_0 [mm]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
Pod povrchem	10,03	78,90	50	401	768	12,4	29,2
Polovina čtv. průřezu	10,03	79,01	50	370	699	14,8	31,5
Střed	10,02	78,85	50	324	621	16,2	33,8

Mikrostrukturní zkoušky bloku

Stanovení velikosti zrna bylo provedeno podle ČSN EN ISO 643 [18], srovnávací metodou při stonásobném zvětšení. Použit byl mikroskop MeF3A. Vzorky byly leptány v Nitalu 4 %.

Mikrostrukturní zkoušky byly provedeny s ohledem na získání strukturních informací o vstupním materiálu. Struktura je tvořena feritem po hranicích perlitického zrna. Zrna feritu jsou polyedrického protáhlého tvaru na hranicích perlitického zrna (tvořící řetízky). Uvnitř perlitických zrn můžeme vidět acikulární ferit, pilovité výběžky feritu na hranicích perlitického

zrna. Widmannstättenovy jehlice jsou vyobrazeny ve více směrech. Bloky indexu až 00 vidíme na **Obr 24**. Index 00 je maximální velikost zrna dle etalonu v ASTM E112 [24].



Obr. 23 Mikrostruktura bloku v příčném směru

7.1.2. Rozbor struktury vykované nápravy bez tepelného zpracování

Popis

Rozbor mechanických vlastností a mikrostruktury byl proveden na vykované surové nápravě neovlivněné tepelným zpracováním. Při uvolňovacích zkouškách po tepelném zpracování je surová náprava rozřezána a již není možné nápravu použít pro další operace výroby – opracování, lakování apod. Z tohoto důvodu jsem zvolil využití odpadu po pálení náprav **Obr. 23**, tento proces je popsán v kapitole 4.4. Přebytečný materiál, který je upálen na pálicím stroji je teplotně ovlivněn procesem pálení, proto veškeré zkoušky musely být odebrány minimálně 70 mm od místa pálení. Tento upálený materiál byl převezen na provoz přípravy vzorků, kde byly zpracovány vzorky pro zkoušky vrubové houževnatosti, vzorky pro tahovou zkoušku a vzorky pro získání mikrostruktury ze surové nápravy.



Obr. 24 Odpad po pálení náprav na požadovanou délku.

Vrubová houževnatost nápravy bez tepelného zpracování

Na upáleném čepu byla provedena zkouška vrubové houževnatosti. Zkouška byla provedena ve středu výkovku podélně ve směru osy. Výsledek zkoušky na výkovku bez tepelného zpracování níže v **Tab.14**

Tab. 14 Vrubová houževnatost ve středu výkovku bez tepelného zpracování.

Umístění vzorku na bloku	Orientace tělesa	Teplota zkušební vzorku	Typ vzorku	Nárazová práce
Polovina poloměru	podélný	20 °C	KU5-300 10x10	32 J

Tahová zkouška nápravy bez tepelného zpracování

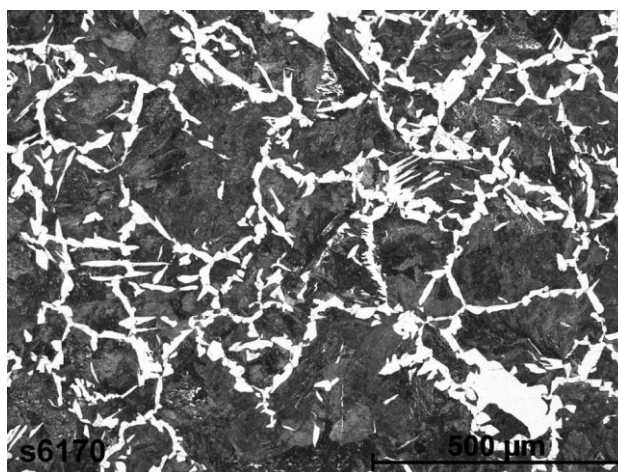
Při této zkoušce byla sledována mez pevnosti v tahu, výsledky jsou uvedeny v **Tab. 15**. Zkouška tahem byla provedena podle ČSN EN ISO 6892-1 [22] na trhacím stroji INSTRON 5985. Teplota prostředí $23\pm5^{\circ}\text{C}$. Odběr těles byl proveden podle ČSN EN ISO 683–1 [23]. Zkušební vzorek byl odebrán ze středu výkovku.

Tab. 15 Výsledné hodnoty tahové zkoušky výkovku bez tepelného zpracování.

Umístění vzorku na bloku	Průměr d_0 [mm]	Průřez S_0 [mm ²]	Počáteční měřená délka L_0 [mm]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
Střed	10,03	79,01	50	304	599	26,1	53,1

Mikrostrukturní zkouška nápravy bez tepelného zpracování

Mikrostruktura byla zkoumána ve středu výkovku s ohledem na porovnání velikosti zrna před a po normalizačním žíhání. Na **Obr. 26** můžeme vidět nehomogenní strukturu v rámci odebraného vzorku nápravy bez tepelného zpracování. Struktura je tvořena feritem po hranicích perlitického zrna. Zrna feritu jsou polyedrického protáhlého tvaru na hranicích perlitického zrna (tvořící řetízky). Uvnitř perlitických zrn můžeme vidět acikulární ferit, pilovité výběžky feritu na hranicích perlitického zrna. Widmannstättenovy jehlice jsou vyobrazeny ve více směrech, velikost zrna byla stanovena indexem 4.



Obr. 25 Mikrostruktura vykované nápravy bez tepelného zpracování

7.1.3. Rozbor struktury po standardním tepelném zpracování

Popis

Při nejčastější výrobě železničních náprav ve společnosti Bonatrans Group a.s. pro splnění požadavků dle normy EN13261:2020 [3] jsou nápravy jakosti EA1N vyráběny na kovacím stroji a následně jsou tepelně zpracovány dle normy normalizačním žiháním s příslušným tepelným režimem nastaveným dle praktiky „best practice“ technologii společnosti. Mechanické vlastnosti dle požadavků normy EN13261:2020 [3] jsou s velkou rezervou splněny po prvním normalizačním žihání. Strukturní fázové transformace jsou také v normě. Je hojný výskyt feritických jehlic Widmannstättenovy struktury od povrchu směrem až do středu sedla.

Vrubová houževnatost nápravy po 1. normalizačním žihání

Zkouška rázem v ohybu byla provedena podle ČSN EN ISO 148-1 [25] na kyvadlovém kladivu Charpy RKP 300. Teplota prostředí $23 \pm 5^\circ\text{C}$. Odběr těles byl proveden podle EN 13261:2020 [3]. Po prvním normalizačním žihání očekáváme KU podélně s osou výkovku minimálně ≥ 21 J s průměrnou hodnotou ≥ 30 J. Výsledek zkoušky vidíme v **Tab. 16**.

Tab. 16 Vrubová houževnatost nápravy po 1. normalizačním žihání.

Umístění vzorku na bloku	Orientace tělesa	Teplota zkušební vzorku	Typ vzorku	Nárazová práce
Polovina poloměru sedla	Podélný	20 °C	KU5-300 10x10	38 J
Polovina poloměru sedla	Podélný	20 °C	KU5-300 10x10	39 J
Polovina poloměru sedla	Podélný	20 °C	KU5-300 10x10	38 J

Tahová zkouška nápravy po 1. normalizačním žihání

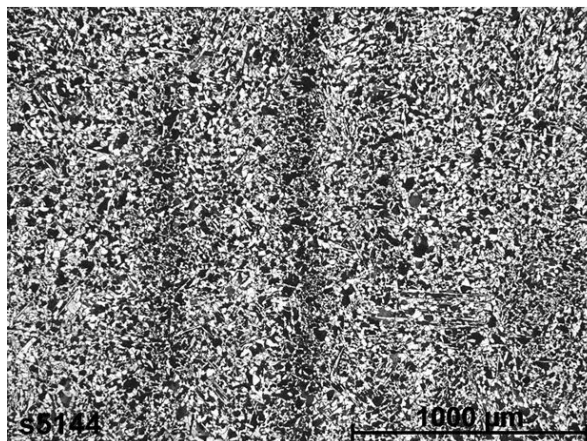
Zkouška tahem byla provedena podle ČSN EN ISO 6892-1 [20] na trhacím stroji INSTRON 5985. Teplota prostředí $23\pm5^{\circ}\text{C}$. Odběr těles byl proveden podle EN 13261:2020 [3] pod povrchem, v polovině poloměru a ve středu sedla náprav. Výsledné hodnoty v **Tab.17**.

Tab. 17 Výsledné hodnoty tahové zkoušky nápravy po 1. normalizačním žihání.

Umístění vzorku na bloku	Průměr d_0 [mm]	Průřez S_0 [mm ²]	Počáteční měřená délka L_0 [mm]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
Na povrchu sedla	10,00	78,5	50	341	562	30,5	60,3
Na povrchu sedla	10,00	78,5	50	359	598	26,4	57,4
Na povrchu sedla	10,01	78,7	50	338	562	29,9	57,7
Polovina poloměru sedla	10,01	78,7	50	340	561	31,6	60,4
Polovina poloměru sedla	10,01	78,7	50	354	591	28,4	56,3
Polovina poloměru sedla	9,98	78,2	50	341	564	27,8	57,3
Střed sedla	9,98	78,2	50	344	575	30,5	59,3
Střed sedla	10,00	78,5	50	350	585	27,8	57,2
Střed sedla	10,00	78,5	50	334	559	29,1	29,1

Mikrostrukturní zkouška nápravy po 1. normalizačním žihání

Stupeň řádkovitosti struktury srovnáním s etalonovou řadou 2C při zvětšení 50x vidíme na **Obr. 27** a Widmännstattenova struktura srovnáním s etalonovou řadou 3A při zvětšení 100x, byly stanoveny podle ČSN 42 0469 [26], a mikroskop Z1m-1. Podíl feritu v mikrostruktuře byl stanoven obrazovou analýzou Axiovision při zvětšení 500x, mikroskop Z1m-1. Stanovení velikosti zrn bylo provedeno podle ISO 643-1 [19], srovnávací metodou při zvětšení 100 x, mikroskop MeF3A. Vzorky byly odebrány v podélném směru a leptané v Nitalu. Velikost zrna byla stanovena indexem 7.



Obr. 26 Mikrostruktura vykované nápravy po 1. normalizačním žíhání

7.2. Optimalizace tepelného režimu pro získání lepších mechanických vlastností

Cíl optimalizace

Cílem optimalizace tepelného režimu bylo zlepšení mechanických vlastností s hlavním požadavkem belgického zákazníka velikost zrna min. index 8 a jemnější. Pro získání výše uvedených požadavků zákazníka bylo navrženo druhé normalizační žíhání s upraveným tepelným režimem, upraveny byly časy a teploty jednotlivých zón v peci.

7.2.1. Rozbor mechanických vlastností po optimalizaci tepelného režimu.

Popis

Po druhém normalizačním žíhání bylo požadováno splnění vysokých požadavků na jemnost výsledné struktury v sedle železniční nápravy. Druhé normalizační žíhání bylo navrženo s nižšími teplotami, než u normalizačního žíhání prvního. Zároveň při tomto snížení bylo navrženo zvýšení doby pobytu v jednotlivých zónách, respektive v posledních dvou zónách pece. Tyto úpravy by měly vést ke zlepšení vlastností a zároveň by mělo být druhé normalizační žíhání úspornější než žíhání první. Mechanické vlastnosti a vyhodnocení struktury jsou popsány níže.

Vrubová houževnatost nápravy po 2. normalizačním žíhání

Zkouška rázem v ohybu byla provedena podle ČSN EN ISO 148-1 [25] na kyvadlovém kladivu Charpy RKP 300. Teplota prostředí $23 \pm 5^\circ\text{C}$. Odběr těles byl proveden podle EN 13261:2020 [3]. Výsledky vrubové houževnatosti po druhém normalizačním žíhání jsou uvedeny v **Tab 18**.

Tab. 18 Vrubová houževnatost nápravy po 2. normalizačním žihání.

Umístění vzorku na bloku	Orientace tělesa	Teplota zkušebního vzorku	Typ vzorku	Nárazová práce
Polovina poloměru sedla	Podélný	20 °C	KU5-300 10x10	44 J
Polovina poloměru sedla	Podélný	20 °C	KU5-300 10x10	44 J
Polovina poloměru sedla	Podélný	20 °C	KU5-300 10x10	46 J
Polovina poloměru sedla	Podélný	- 40 °C	KV2-300 10x10	20 J
Polovina poloměru sedla	Podélný	- 40 °C	KV2-300 10x10	11 J
Polovina poloměru sedla	Podélný	- 40 °C	KV2-300 10x10	14 J

Tahová zkouška nápravy po 2. normalizačním žihání

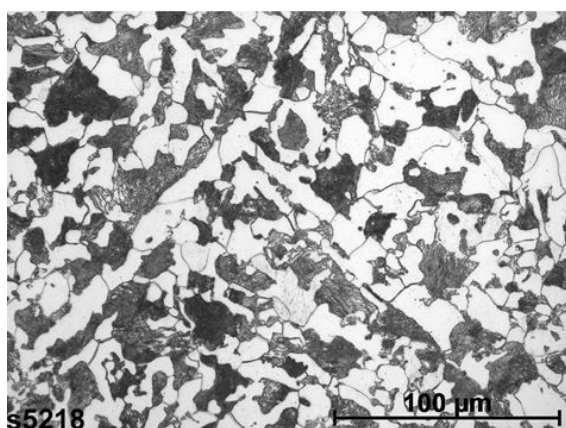
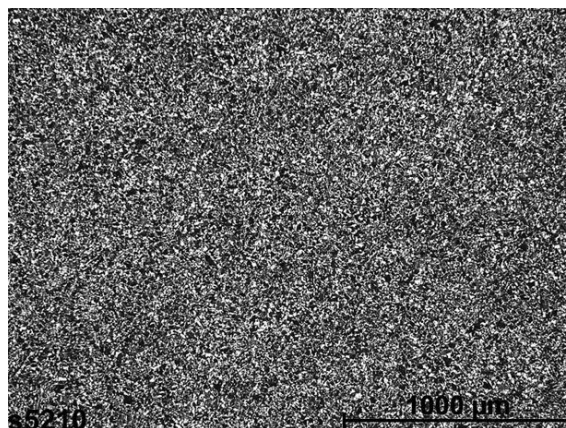
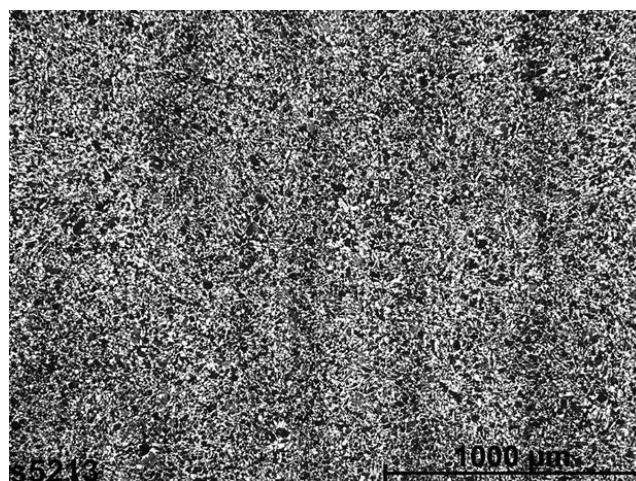
Zkouška tahem byla provedena podle ČSN EN ISO 6892-1 [22] na trhačím stroji INSTRON 5985. Teplota prostředí $23 \pm 5^\circ\text{C}$. Odběr těles byl proveden podle EN 13261:2020 [3] pod povrchem, v polovině poloměru a ve středu sedla náprav. Výsledné hodnoty tahové zkoušky jsou uvedeny v **Tab. 19**.

Tab. 19 Výsledné hodnoty tahové zkoušky nápravy po 2. normalizačním žihání.

Umístění vzorku na bloku	Průměr d_0 [mm]	Průřez S_0 [mm ²]	Počáteční měřená délka L_0 [mm]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
Na povrchu sedla	9,99	78,4	50	356	572	31,6	62,3
Na povrchu sedla	10,00	78,5	50	378	613	27,9	58,0
Na povrchu sedla	10,00	78,5	50	349	569	29,9	59,7
Polovina poloměru sedla	10,00	78,5	50	357	565	29,8	62,8
Polovina poloměru sedla	9,99	78,4	50	377	605	27,4	58,8
Polovina poloměru sedla	9,99	78,4	50	354	565	29,4	59,2
Střed sedla	10,00	78,5	50	357	576	30,4	61,4
Střed sedla	9,99	78,4	50	371	601	27,9	58,8
Střed sedla	10,00	78,5	50	353	565	31,2	60,1

Mikrostrukturní zkouška nápravy po 2. normalizačním žitání

Struktura je tvořena perlitom a feritem, výskyt feritických jehlic Widmannstättenovy struktury se zřetelněji vyskytují až ve střední oblasti nápravy. Jehlice, respektive původní jehlice, jsou velmi často rozpadlé na sub zrna. U povrchu je struktura rovnoměrná s polyedrickým vzhledem feritických zrn i kolonií perlitu. Perlit se vyskytuje takřka výhradně v lamelární formě **Obr. 28**. Řádkovitost se objevuje až cca v 50 mm pod surovým povrchem. Na **Obr. 29** vidíme strukturu bez řádkovitosti – odběr pod povrchem, směrem do středu je řádkovitost intenzivnější **Obr. 30**.

**Obr. 27** Způsoby vyloučení feritu.**Obr. 28** Mikrostruktura bez řádkovitosti.**Obr. 29** Mikrostruktura se zvyšující se řádkovitostí ve středu nápravy.**7.3. Tavba se zvýšeným obsahem niklu****Cíl experimentu s upraveným chemickým složením**

Cílem dílčího experimentu bylo zlepšení mechanických vlastností s hlavním požadavkem severského zákazníka dosažení vrubové houževnatosti při teplotách zkušební vzorku -40 °C

přesné požadované hodnoty jsou uvedeny v **Tab.20**. Pro získání výše uvedených požadavků zákazníka bylo navrženo zvýšit procento niklu v tavebním rozboru, toto navýšení je stále v souladu s evropskou normou pro výrobu železničních náprav EN13261:2020 [3]. Pro zaručené dosažení bylo navrženo rovněž jako v prvním experimentu druhé normalizační žíhání s upraveným tepelným režimem.

Tab. 20 Požadavky vrubové houževnatosti při teplotě vzorku -40 °C.

Umístění vzorku	Orientace tělesa	Teplota zkušebního vzorku	Typ vzorku	Nárazová práce průměrná	Nárazová práce dohoda
Pod povrchem	Podélný	-40 °C	KV2-300 10x10	20 J	14
Polovina poloměru	Podélný	-40 °C	KV2-300 10x10	25 J	17,5 J
Střed	Podélný	-40 °C	KV2-300 10x10	23,7 J	16,6 J
Pod povrchem	Příčný	-40 °C	KV2-300 10x10	14,4 J	10 J
Polovina poloměru	Příčný	-40 °C	KV2-300 10x10	18 J	12,6 J
Střed	Příčný	-40 °C	KV2-300 10x10	17 J	12 J

7.3.1. Rozbor struktury náprav se zvýšeným procentem niklu

Popis

Pro zvýšení mechanických vlastností, zejména vrubové houževnatosti a snahou eliminovat výskyt feritických jehlic Widmannstättenovy struktury byla navržena tavba se zvýšeným hmotnostním procentem niklu. Toto navýšení procentuálního poměru niklu je stále v rámci předpisu, který udává evropská norma EN13261:2020 [3]. Z nápravy byly odebrány ze sedla dle EN 13261:2020 [3] zkušební tělesa pro provedení a tahových zkoušek a zkoušek rázem v ohybu KU5 a KV2 z povrchu, poloviny poloměru a ze středu nápravy. Také byly odebrány zkušební vzorky pro posouzení mikrostruktury a stanovení velikosti zrna.

Vrubová houževnatost nápravy se zvýšeným obsahem niklu

Zkouška rázem v ohybu byla provedena podle ČSN EN ISO 148-1 [25] na kyvadlovém kladivu Charpy RKP 300. Teplota prostředí $23 \pm 5^\circ\text{C}$. Odběr těles byl proveden podle EN 13261:2020 [3]. Výsledky vrubové houževnatosti po druhém normalizačním žíhání jsou uvedeny v **Tab. 21**.

Tab. 21 Vrubová houževnatost při +20 °C nápravy se zvýšeným obsahem niklu.

Umístění vzorku	Orientace tělesa	Teplota zkušebního vzorku	Typ vzorku	Nárazová práce
Polovina poloměru sedla	Podélný	20 °C	KU5-300 10x10	54 J
Polovina poloměru sedla	Podélný	20 °C	KU5-300 10x10	53 J
Polovina poloměru sedla	Podélný	20 °C	KU5-300 10x10	51 J

Pro ověření nejpřísnějších požadavků severského zákazníka byly provedeny zkoušky vrubové houževnatosti při minusových teplotách, konkrétně vzorky při zkoušení musí mít teplotu – 40 °C. Zkušební tělesa byly zhotoveny s V vrubem o rozměru vrubu 2 mm. Výsledné hodnoty vidíme v tabulce níže **Tab. 22**.

Tab. 22 Vrubová houževnatost při -40 °C u náprav se zvýšeným obsahem niklu.

Umístění vzorku	Orientace tělesa	Teplota zkušebního vzorku	Typ vzorku	Nárazová práce
Pod povrchem	Podélný	-40 °C	KV2-300 10x10	24 J
Polovina poloměru	Podélný	-40 °C	KV2-300 10x10	19 J
Střed	Podélný	-40 °C	KV2-300 10x10	18 J
Pod povrchem	Příčný	-40 °C	KV2-300 10x10	28 J
Polovina poloměru	Příčný	-40 °C	KV2-300 10x10	19 J
Střed	Příčný	-40 °C	KV2-300 10x10	17 J

Tahová zkouška nápravy se zvýšeným obsahem niklu

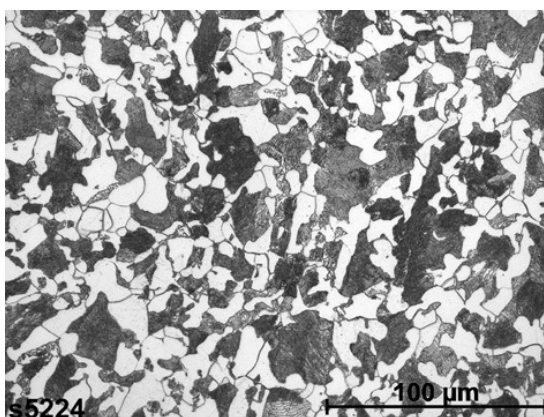
Zkouška tahem byla provedena podle ČSN EN ISO 6892-1 [22] na trhacím stroji INSTRON 5985. Teplota prostředí 23±5°C. Odběr těles byl proveden podle EN 13261:2020 [3] pod povrchem, v polovině poloměru a ve středu sedla náprav. Výsledky tahové zkoušky jsou uvedeny v **Tab. 23**.

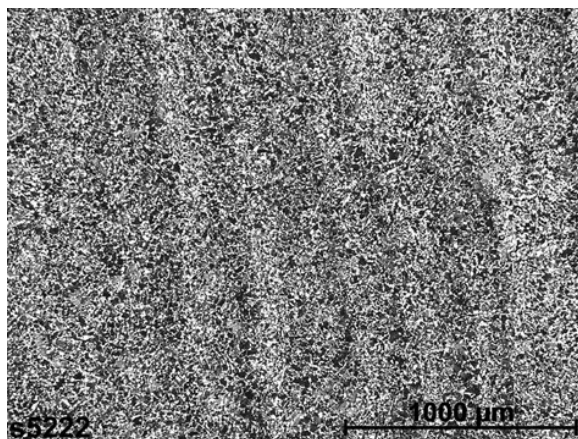
Tab. 23 Výsledné hodnoty tahové zkoušky náprav se zvýšeným obsahem niklu.

Umístění vzorku	Průměr d_0 [mm]	Průřez S_0 [mm ²]	Počáteční měřená délka L_0 [mm]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
Na povrchu sedla	10,00	78,5	50	377	609	29,4	62,4
Na povrchu sedla	9,99	78,4	50	385	619	29,5	62,2
Na povrchu sedla	10,00	78,5	50	394	633	27,5	60,3
Polovina poloměru sedla	10,00	78,5	50	371	606	30,1	62,7
Polovina poloměru sedla	10,00	78,5	50	382	615	29,4	61,2
Polovina poloměru sedla	10,00	78,5	50	388	633	28,6	57,6
Střed sedla	10,00	78,5	50	367	605	29,6	62,7
Střed sedla	10,00	78,5	50	378	613	29,5	61,3
Střed sedla	10,00	78,5	50	395	630	27,7	58,9

Mikrostrukturní zkouška nápravy niklové tavby

Struktura je tvořena perlitem a feritem, výskyt feritických jehlic Widmannstättenovy struktury takřka není pozorován. Pozůstatky původní Widmannstättenovy struktury jen ojediněle připomínají shluky feritu ve středu nápravy **Obr. 31**. U povrchu je struktura rovnoměrná s polyedrickým vzhledem feritických zrn i kolonii perlitu. Perlit se vyskytuje takřka výhradně v lamelární formě. Řádkovitost se objevuje až cca v 50 mm pod surovým povrchem a směrem do středu nabírá jemně na intenzitě **Obr. 32**. Velikost zrna byla stanovena indexem 9.

**Obr. 30** Mikrostruktura bez jehlic Widmannstättenovy struktury.



Obr. 31 Mikrostruktura se zvýšenou řádkovitostí

7.4. Ověření vlastností jakosti EA1T

Cíl experimentu

Cílem experimentu je ověření vlastností tepelné zpracované jakosti EA1T s ohledem na splnění přísných požadavků severských zákazníků, zejména pevnostních vlastností pod povrchem, které jsou zapotřebí ke splnění únavových zkoušek výrobku. U této jakosti je dle evropské normy předepsané tepelné zpracování kalení s následným popouštěním. Tento experiment slouží k získání vlastností oceli EA1T a porovnání jej s experimentem jakosti EA1N v druhé části diplomové práce, kdy bylo navrženo 2. normalizační žihání, případně bylo experimentováno s chemickým složením oceli, konkrétně přidáním niklu, zda jsme schopni dosáhnout podobných mechanických a strukturních vlastností oceli s různým tepelným zpracováním dle normy.

Vrubová houževnatost

Zkouška rázem v ohybu byla provedena podle ČSN EN ISO 148-1 [25] na kyvadlovém kladivu Charpy RKP 300. Teplota prostředí $23 \pm 5^\circ\text{C}$. Odběr těles byl proveden podle EN 13261:2020 [3]. Výsledky vrubové houževnatosti u jakosti se zrychleným povrchovým ochlazením ve vodě a následným popouštěním jsou uvedeny v **Tab. 24**. Zkouška byla provedena s teplotou vzorku $+20^\circ\text{C}$, a také pro porovnání s teplotou vzorku -40°C .

Tab. 24 Vrubová houževnatost u nápravy se zrychleným ochlazením povrchu

Umístění vzorku	Orientace tělesa	Teplota zkušebního vzorku	°C Typ vzorku	Nárazová práce
Polovina poloměru sedla	Podélný	20 °C	KU5-300 10x10	56 J
Polovina poloměru sedla	Podélný	20 °C	KU5-300 10x10	53 J
Polovina poloměru sedla	Podélný	20 °C	KU5-300 10x10	54 J
Pod povrchem	Podélný	-40 °C	KV2-300 10x10	37 J
Polovina poloměru	Podélný	-40 °C	KV2-300 10x10	16 J
Střed	Podélný	-40 °C	KV2-300 10x10	14 J
Pod povrchem	Příčný	-40 °C	KV2-300 10x10	19 J
Polovina poloměru	Příčný	-40 °C	KV2-300 10x10	30 J
Střed	Příčný	-40 °C	KV2-300 10x10	16 J

Tahová zkouška

Zkouška tahem byla provedena podle ČSN EN ISO 6892-1 [22] na trhačím stroji INSTRON 5985. Teplota prostředí $23 \pm 5^\circ\text{C}$. Odběr těles byl proveden podle EN 13261:2020 [3] pod povrchem, v polovině poloměru a ve středu sedla náprav. Výsledky tahové zkoušky jsou uvedeny v **Tab. 25**.

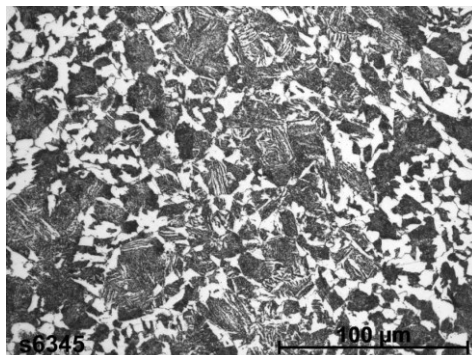
Tab. 25 Výsledky tahové zkoušky u náprav se zrychleným ochlazením povrchu.

Umístění vzorku	Průměr d_0 [mm]	Průřez S_0 [mm ²]	Počáteční měřená délka L_0 [mm]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
Na povrchu sedla	10,03	79,0	50	418	651	25,2	70,0
Polovina poloměru sedla	10,01	78,7	50	414	677	24,4	66,3
Střed sedla	10,02	78,9	50	356	617	29,1	66,8

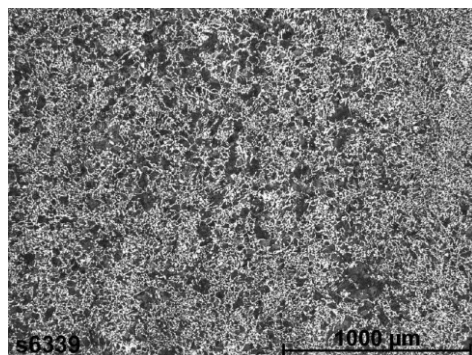
Mikrostrukturní zkouška

Widmannstättenova struktura byla stanovena srovnáním s etalonovou řadou 3B při zvětšení 100x (norma přímo doporučuje), byly stanoveny podle ČSN 42 0469 [26], na mikroskopu Z1m-1. Podíl feritu v mikrostruktuře byl stanoven obrazovou analýzou Axiovision při zvětšení 500x, mikroskop Z1m-1. Stanovení velikosti zrn bylo provedeno podle ISO 643 [19], srovnávací

metodou při zvětšení 100 x, mikroskop MeF3A. Na **Obr. 33** vidíme občasný výskyt zakalené složky. V některých pásech jemnost zrna je až index 10. Na **Obr. 34** lze pozorovat mikrostrukturu bez řádkovitosti.



Obr. 32 Občasný výskyt zakalené složky u nápravy se zrychleným ochlazením povrchu.

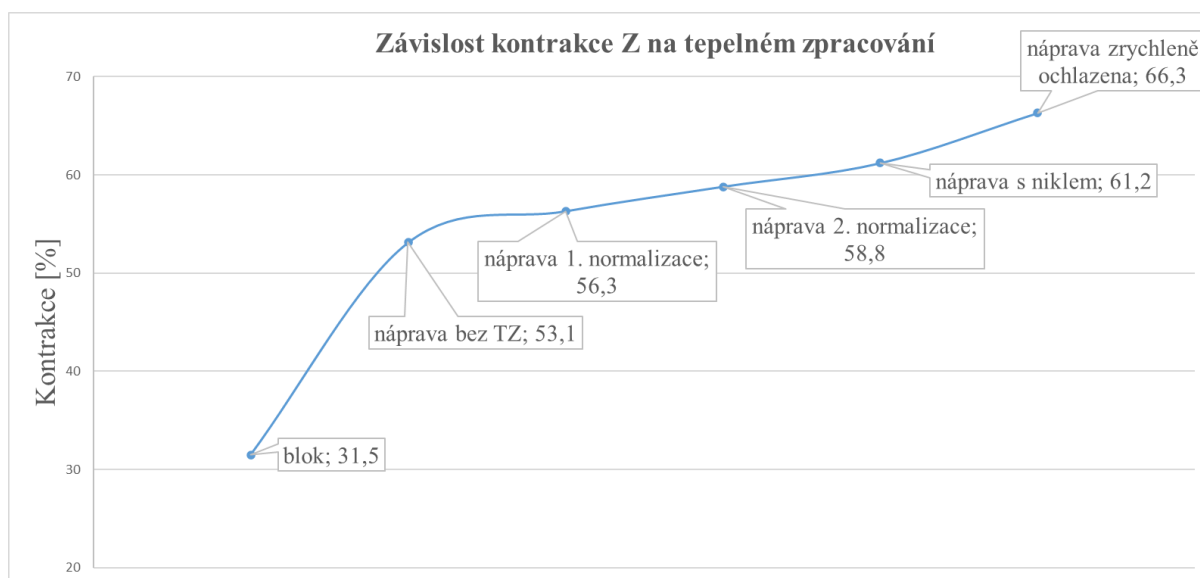


Obr. 33 Mikrostruktura bez výrazné řádkovitosti.

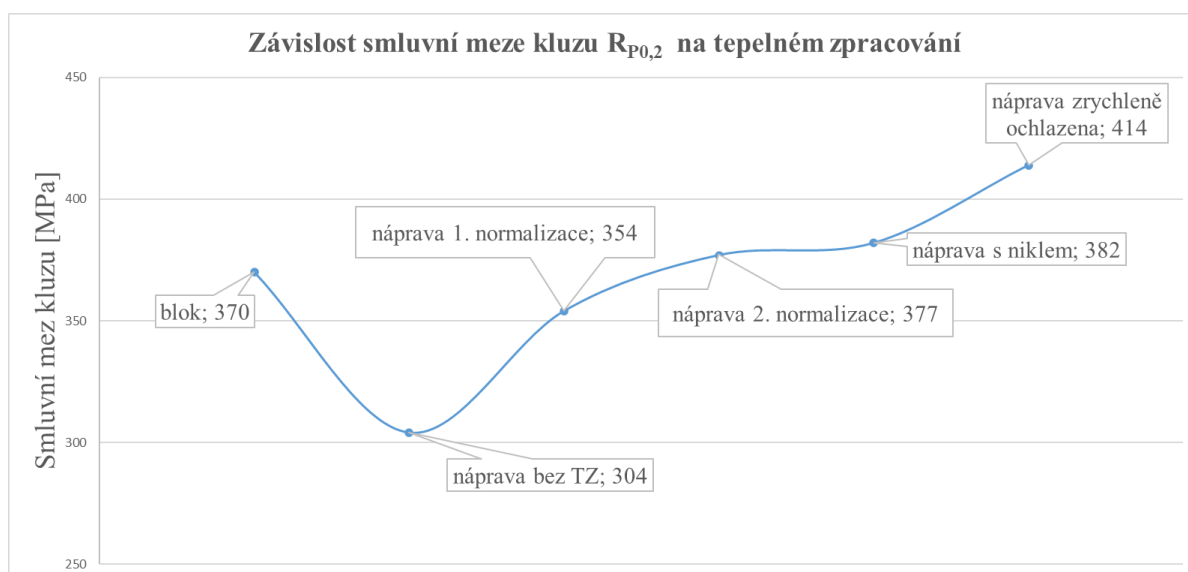
8. DISKUZE VÝSLEDKŮ

8.1. Porovnání bloku s nápravou bez tepelného zpracování

Hlavním úkolem experimentální práce bylo porovnávání mechanických vlastností při použití různého tepelného zpracování a úpravy chemického složení. Získané informace v **bodě 7.1.1. a 7.1.2.** se běžně nedělají, ale jsou důležité pro pochopení zlepšení mechanických vlastností po deformaci kombinací uzavřeného a volného kování oceli z převálcovaného plynule odlitého materiálu a také pomůckou pro určování technologických postupů tepelného zpracování železničních náprav. Tyto dílčí experimentální výsledky vedou k dosažení veškerých požadovaných kritérií zákazníků. V **bodě 7.1.2.** můžeme sledovat mírné navýšení vrubové houževnatosti v místě poloviny poloměru největšího průřezu o 10 J na hodnotu 32 J. Naopak mez kluzu a mez pevnosti v tahu mírně klesá na hodnoty o 20 MPa nižší, zatím co kontrakce oceli se zvýšila o 20 %. Porovnání hodnoty kontrakce a meze kluzu závislé na tepelném zpracování vidíme na **Obr. 33** respektive **Obr. 34**. Struktura u vstupního materiálu a také u oceli po deformaci je nehomogenní, tvořená perlitem po hranicích feritického zrna. Perlitické zrna mají polyedrický tvar. Lze tedy konstatovat, že struktura nebyla výrazně zlepšena pomocí deformace a je nutné výrobky tepelně zpracovat.



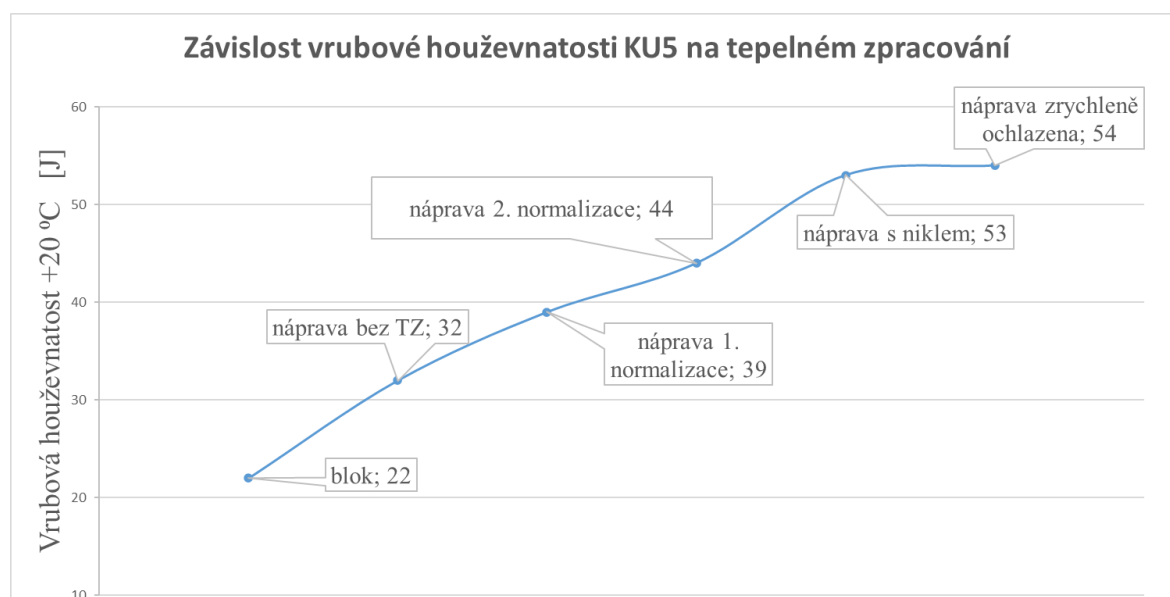
Obr. 34 Závislost kontrakce Z na tepelném zpracování náprav.



Obr. 35 Závislost smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ na tepelném zpracování náprav.

8.2 Tepelné zpracování železničních náprav

Pro získání mechanických vlastností, homogenní struktury, a především pro splnění veškerých požadavků evropské normy EN13261 [3] u jakosti EA1N, která jsou uvedena v bodě 2.3.1. jsou železniční nápravy normalizačně žíhány. Normalizačním žíháním byla vrubová houževnatost zvýšena o dalších 7 J na hodnotu 39 J, při zachování pevnostních charakteristik oceli, výsledky vrubové houževnatosti vidíme na **Obr.37**. Struktura je již tvořena homogenním rozložením feritu a perlitu. Na padesáti násobném zvětšení lze pozorovat výrazná řádkovitost struktury.



Obr. 36 Závislost vrubové houževnatosti $KU5$ na tepelném zpracování náprav.

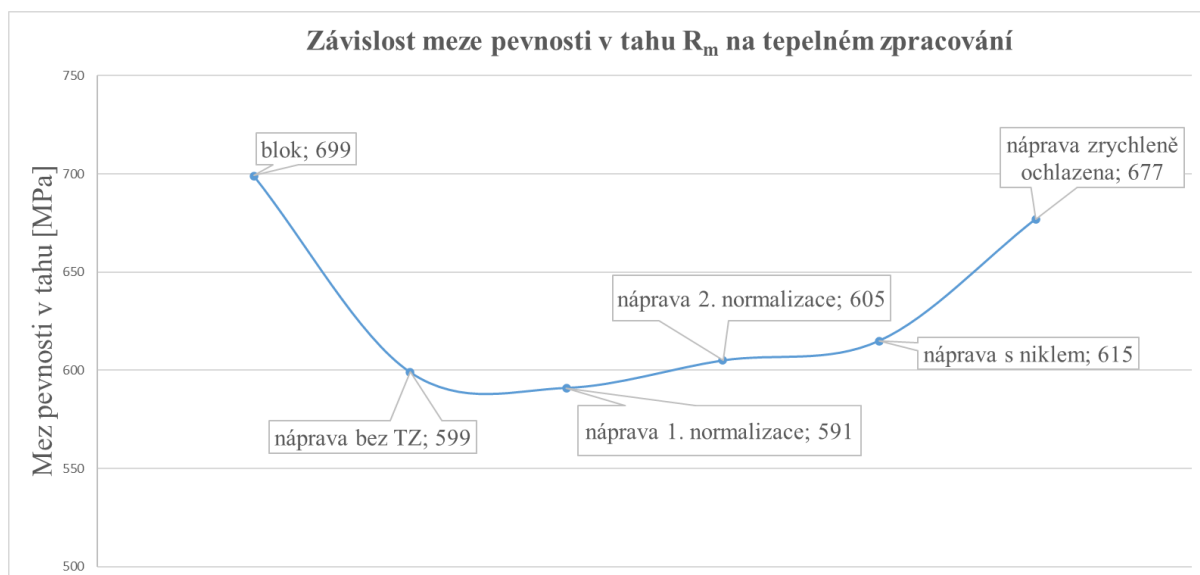
8.3. Porovnání prvního a druhého normalizačního žíhání

Po prvním normalizačním žíhání bylo dosaženo splnění požadavků evropské normy pro výrobu železničních náprav. Lze se setkat se situací, kdy zákazník požaduje mimo normu vyšší mechanické vlastnosti a strukturu. Tímto požadavkem belgických železničních drah se zabývá další experimentální část, kdy bylo potřeba dosahovat především jemnějšího zrna s indexem minimálně 8. Ke zjemnění zrna vedlo provedení druhého normalizačního žíhání. Po druhém tepelném zpracování došlo k dalšímu navýšení vrubové houževnatosti na hodnotu 44 J, mírného navýšení meze pevnosti na hodnotu v polovině poloměru 615 MPa. Struktura je tvořena perlitem a feritem, výskyt feritických jehlic Widmannstättenovy struktury se zřetelněji vyskytují až ve střední oblasti nápravy. Původní jehlice, jsou velmi často rozpadlé na subzrna. U povrchu je struktura rovnoměrná s polyedrickým vzhledem feritických zrn i kolonii perlitu. Perlit se vyskytuje takřka výhradně v lamelární formě. Výraznější rádkovitost se objevuje až od úrovně 50 mm pod povrchem. Index velikosti zrna je na úrovni 8. Druhým normalizačním žíhání nebylo prokázáno bezproblémové splnění přísných kritérií belgického zákazníka. Index velikosti zrna byl místy ve struktuře vyhodnocen až hodnotou 9,5, ale struktura obsahuje bloky zrn, která byla vyhodnocena hodnotou indexu 7,5.

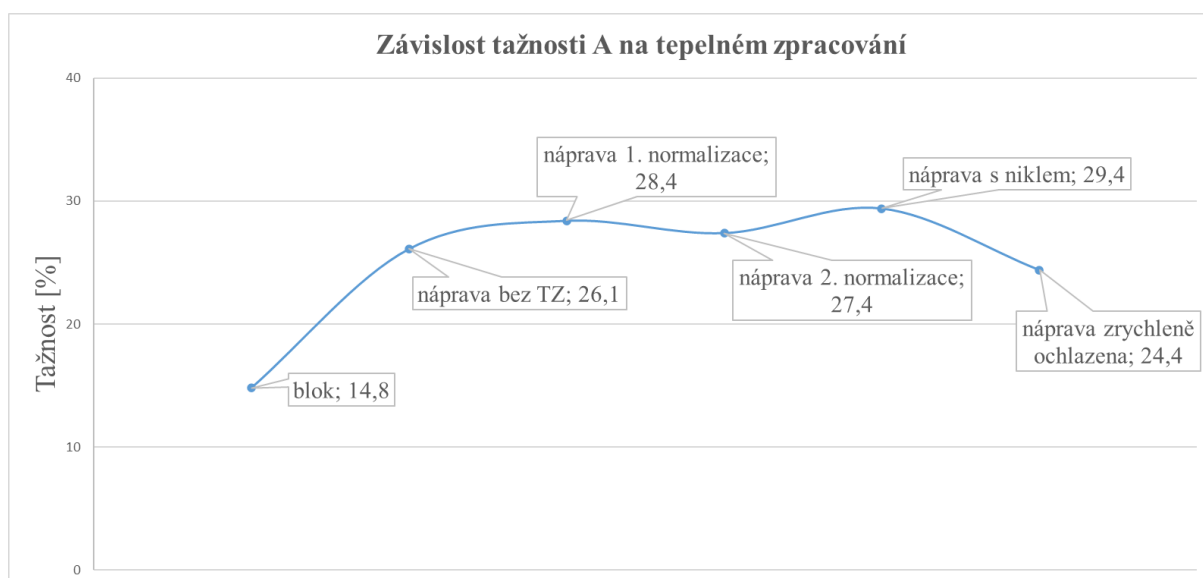
8.4. Porovnání 2. normalizačního žíhání s tavbou se zvýšeným obsahem niklu

Podobně jako výše uvedené přísnější požadavky na strukturu, jsem se nyní v experimentální části zabýval cílem dosažením vrubové houževnatosti při minusových teplotách. Jelikož těchto požadavků nebylo dosaženo po druhém normalizačním žíhání u běžné tavby, byla navržena tavba se zvýšeným obsahem niklu, díky kterého docházelo ke zvyšování mechanických vlastností. Vliv niklu v oceli ovlivňuje polohu ochlazovacích křivek ARA diagramu. Především vliv niklu způsobuje zpevnění zrn feritu. Tento jev je důležitý zejména pro vyrovnání vlivu zjemnění zrna v mikrostruktuře s narůstajícím podílem feritu. Vliv niklu výrazně zvýšil vrubovou houževnatost při pokojové teplotě, kdy se dostáváme na průměrné hodnoty přes 53 J a vrubová houževnatost při - 40 °C byla v příčném směru vzorků splněna velmi na hraně, v podélném směru hodnoty nebyly dostatečné. Průměrná hodnota meze pevnosti v tahu je již na hodnotách přes 620 MPa. Na **Obr. 37** vidíme porovnání meze pevnosti v tahu v závislosti na tepelném zpracování náprav. Tažnost v závislosti na tepelném zpracování vidíme na **Obr.38**. Po druhém normalizačním žíhání u tavby se zvýšeným obsahem

niklu je struktura tvořena homogenním rozložením feritu a perlitu. Výskyt Widmannstätténovy struktury není takřka pozorován, jen ojediněle ve středu nápravy. Zvýšená řádkovitost je také až na vzorcích odebraných ve středu nápravy.



Obr. 37 Závislost meze pevnosti v tahu R_m na tepelném zpracování náprav.

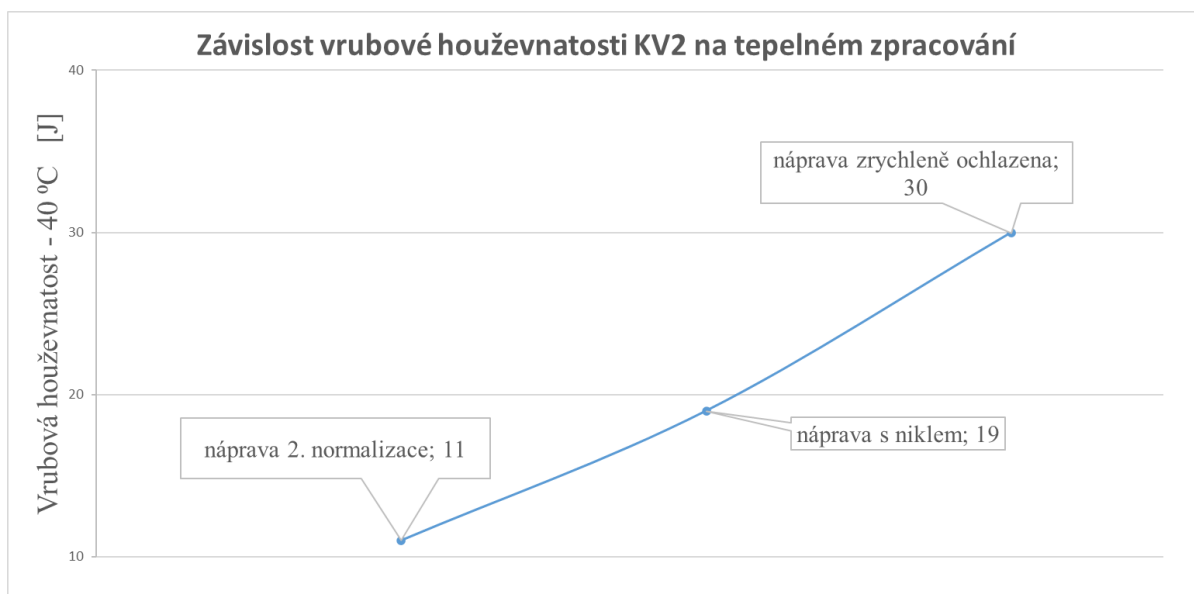


Obr. 38 Závislost tažnosti A na tepelném zpracování náprav.

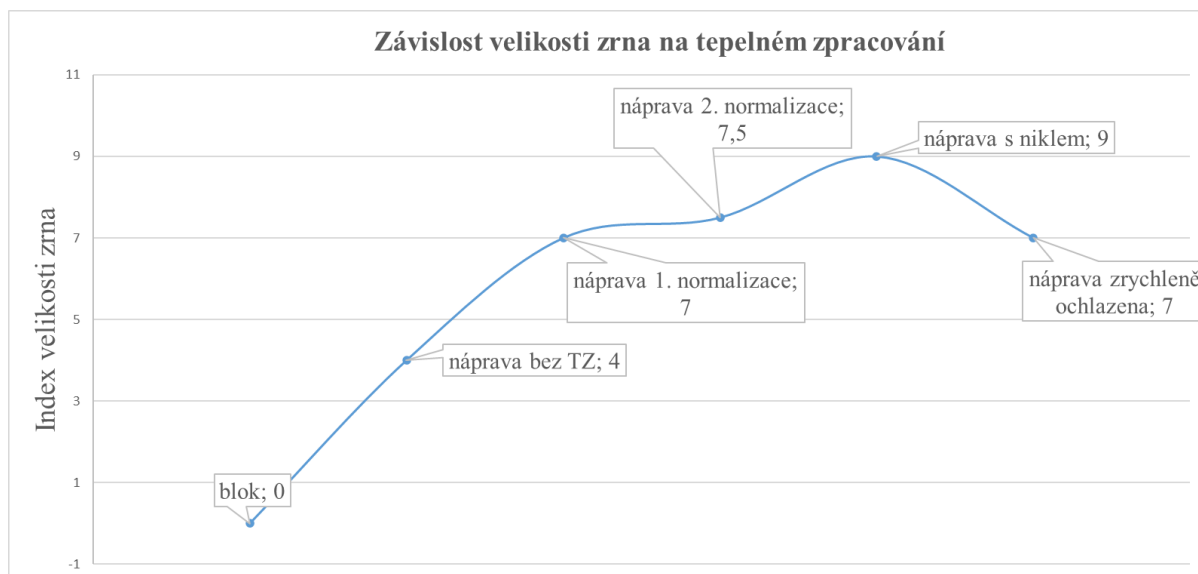
8.5. Porovnání vlastností A1N s A1T

Za účelem posouzení zvýšené rychlosti ochlazování, se v poslední části experimentální práce zabývám porovnání výrobků se stejným chemickým složením, ale s různým tepelným zpracováním, kde je cílem dosáhnout podobných mechanických

vlastností, ale je podmínka, že jakost A1N nesmí obsahovat zakalené fáze ve struktuře. Při tahové zkoušce byla naměřená mez pevnosti v tahu 677 MPa, tato hodnota už je za horní povolenou hranici pro jakost A1N. Struktura kalených náprav je bez výraznější řádkovitosti, ale místy se objevuje zakalená fáze struktury. Vrubová houževnatost při pokojové teplotě je u jakosti A1T na úrovni 54 J, tato hodnota je podobná hodnotám po druhém normalizačním žihání, případně také u tavby se zvýšeným obsahem niklu. Vrubová houževnatost při minusových teplotách je výrazně vyšší než u všech experimentů normalizačního žihání, výsledky vidíme na **Obr. 39**, s hodnotou 30 J jsou splněny i prvotní požadavky zákazníka. Tato informace vypovídá o nutnosti uvažovat o zrychleném ochlazování u jakosti A1N. Na základě těchto výsledků bude společnost navržena úprava způsobu chlazení po normalizačním žihání. Velikost zrna u jakosti A1T bylo stanoveno na hodnotu indexu 7. Porovnání vlivu tepelného zpracování na hodnotu indexu velikosti zrna je znázorněno na **Obr. 40**, kde můžeme pozorovat splnění požadavku na velikost indexu zrna minimálně 8, tato podmínka byla splněna u niklové tavby.



Obr. 39 Závislost vrubové houževnatosti KV2 na tepelném zpracování náprav.



Obr. 40 Závislost velikosti zrna na tepelném zpracování náprav.

9. ZÁVĚR

Předmětem předložené diplomové práce bylo řešení problematiky finálních mechanických a strukturních vlastností železničních náprav jakosti EA1N. Tyto dva hlavní problémy byly řešeny odebráním zkušebních vzorků z největších průřezů železničních náprav. Pro lepší orientaci a představení mechanických vlastností bylo provedeno zkoušení u železničních náprav bez tepelného zpracování a zkoušení na vstupním materiálu.

Oba řešené problémy byly prováděny za účelem splnění přísných požadavků od zákazníků společnosti GHH-Bonatrans Group a.s. Tyto požadavky byly nad rámec evropských standardů, dle kterých jsou nápravy těmto zákazníkům standardně dodávány.

Před samotným tepelným zpracováním byly provedeny zkoušky mechanických a strukturních vlastností na vstupním materiálu a na železniční nápravě bez tepelného zpracování. Toto zkoušení bylo provedeno pro získání zkušeností, jakým způsobem dochází ke zlepšování vlastností železničních náprav od vstupního materiálu až po konečný výrobek. Tento experiment byl prováděn na základě požadavků belgického zákazníka, který požadoval velikost zrna index 8 a jemnější. Na základě tohoto požadavku nebylo dosaženo velikosti zrna po prvním normalizačním žíhání, proto bylo navrženo druhé normalizační žíhání s upraveným tepelným režimem. Výsledkem druhého normalizačního žíhání bylo navýšení mechanických vlastností oceli, ale bohužel nebyla splněna podmínka dosažení velikosti zrna s indexem 8. Nejjemnější zrno bylo rozeznáno pod povrchem, kde bylo dosaženo indexu 9,5, ale pozice – polovina poloměru největšího průřezu, která je dle normy určující bylo pozorováno zrno velikosti indexu 7,5. Splnění těchto požadavků došlo při zkoušení niklové tavby, která byla původně navržena pro získání vyšších mechanických vlastností při minusových teplotách.

Ve druhém experimentu dle severského zákazníka byly požadovány výsledky mechanických vlastností pro provoz v arktických podmínkách. Z tohoto důvodu byly požadovány přísné metody zkoušení vrubové houževnatosti při minusových teplotách. Výsledky vrubové houževnatosti při teplotě vzorku -40 °C nebyly dostatečné po druhé normalizaci, proto byla navržena tavba se zvýšeným obsahem niklu, který by měl přispět ke zvýšení mechanických vlastností. Výsledné hodnoty vrubové houževnatosti u niklové tavby byly splněny jen z části, třetina výsledků byla pod hodnotami požadavků. Jelikož podmínky nebyly splněny, byla vyjednána dohoda se zákazníkem, kdy již dohodnuté požadavky byly splněny. Z tohoto důvodu bylo provedeno u jakosti oceli EA1 tepelné zpracování se zrychleným ochlazením povrchu ve vodě a byly provedeny zkoušky vrubové houževnatosti při minusových

teplotách bez úpravy chemického složení. Výsledky u výrobků se zrychleným ochlazováním byly natolik příznivé, že splnily veškeré požadavky na vrubovou houževnatost při minusových teplotách. Bohužel toto tepelné zpracování nelze použít pro daného zákazníka, jelikož i přes snahu snížení času ochlazování ve vodě, na kratší dobu, byly ve struktuře pod povrchem objeveny zakalené fáze. Na základě těchto výsledků bude společnosti navrženo zrychlené ochlazování náprav po vytažení z pece při náhřevu na normalizační žíhání.

Literatura

- [1] Fuxinghao — The Fastest High-Speed Train in the World @ Since 1998, China Highlights — Discovery Your Way! [cit. 19.4.2021] Dostupné na <https://www.chinatraining.com/china-trains/fuxinghao-the-fastest-high-speed-train-in-the-world.html>
- [2] BALCÁREK, V. aj. *50 & 10 BONATRANS*. Ostrava: Tiskárna Grafico s.r.o. 2009, 162 s.
- [3] EN 13263;2009+A1:2010. *Railway applications – wheelset and bogies – Axles – Product requirements*. 2010, 57 s.
- [4] AAR M-107/M208.: *Manual of Standards and Recommended Practices section G-II Wheels and Axles Manual*, 2019, 186 s.
- [5] Technologie pro výrobu železničních náprav Copyright © 2010–2021, TECH MEDIA PUBLISHING, s.r.o. - Tech Magazín [cit. 9.4.2021] Dostupné na <https://www.zdas.com/cs/produkce/zarizeni-volne-kovani/>
- [6] ČSN EN 10027-1, *Systémy označování oceli – Stavba značek oceli*, 2005, 28 s.
- [7] Technologie radiálního kování ve společnosti VHM © 2019. [cit. 7.2.2021] Dostupné na <https://www.sms-group.com/plants/all-plants/radial-forging-machines/>.
- [8] Výrobní linka železničních náprav v Číně © 2005 [cit.9.4.2021] Dostupné na <http://gdjt.tyhi.com.cn/zzn/zzn/czscx.htm>
- [9] PATER, Z., TOMCZAK, J., BULZAK, T. *Numerical Analysis of the Skew Rolling Process for Rail Axle. Archives of Metallurgy and Materials*. 2015, 459 s.
- [10] DTP 21-012. *Kovárna náprav, materiálový tok, kontrola a evidence výroby*. Bohumín: BONATRANS GROUP a.s. 2015, 13 s.
- [11] DTP 21-014, *Ohřívací pec předvalků na kovárně náprav*. Bohumín: BONATRANS GROUP a.s. 2015, 9 s.
- [12] KRATOCHVÍL, Ondřej *Vliv podmínek kování a tepelného zpracování na jakost železničních náprav*. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. 2019, 31 s
- [13] TOTTEN E. GEORGE, *Steel heat treatment metallurgy and technologies*, Vol. 2. Portland, 2006, 832 s.
- [14] VÁŇOVÁ, Petra. *Základy tepelného zpracování*. Studijní opora. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. 2011, 127 s.

-
- [15] Driml Bohuslav – Kalení a popouštění © 2021 [cit. 19.3.2021] Dostupné na <http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep07.pdf>
- [16] FABÍK, Richard *Tváření kovů*. Studijní opora. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. 2012, 341 s.
- [17] SCHULER RAILWAY, *Forging systems for the railway industry*, 20 s.
- [18] KAWULOK P., KAWULOK R., RUSZ S. *Stanovení velikosti zrna v závislosti na parametrech indukčního ohřevu ocelové tyče*. Studijní opora. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. 2017, 11 s.
- [19] ČSN EN ISO 643 *Ocel – Mikrografické stanovení velikosti zrn*, 2003, 40 s.
- [20] GREGER, M., aj. Progresivní technologie volného kování. *Kovárenství*. 5/2017, 61 s.
- [21] MAZANCOVÁ, Eva *Technické materiály I. – kovové materiály*. Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. 2012, 150 s.
- [22] ČSN EN ISO 6892-1 *Kovové materiály – zkoušení tahem*, 2021, 76 s.
- [23] ČSN EN ISO 683-1 *Oceli pro tepelné zpracování, oceli legované a oceli automatové*, 2019, 48 s.
- [24] ASTM E112 – 13 *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*, 2013, 28 s.
- [25] EN ISO 148-1 *Metallic materials – Charpy impact test*, 2017, 32 s.
- [26] ČSN 42 0469 *Metalografické hodnocení tvářených hutních výrobků*, 1980, 28 s.
- .